

**JEOTERMAL VE GÜNEŞ ENERJİSİNİN ELEKTRİK VE HİDROJEN
ÜRETİMİ, ISITMA VE SOĞUTMA İÇİN KULLANILMASININ
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ,
TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan ŞEN

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

Bu tez çalışması 218M739 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JEOTERMAL VE GÜNEŞ ENERJİSİNİN ELEKTRİK VE
HİDROJEN ÜRETİMİ, ISITMA VE SOĞUTMA İÇİN
KULLANILMASININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
MODELLENMESİ, TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU**

Ozan ŞEN

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Ozan ŞEN tarafından hazırlanan “Jeotermal ve Güneş Enerjisinin Elektrik ve Hidrojen Üretimi, Isıtma ve Soğutma için Kullanılmasının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, Termoeconomik Analizi ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.


Danışman : Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

İmza

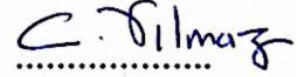
Başkan : Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi



Üye : Prof. Dr. Mehmet KANOĞLU
Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi



Üye : Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahimEROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28 / 05 / 2021



Ozan ŞEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JEOTERMAL VE GÜNEŞ ENERJİSİNİN ELEKTRİK VE HİDROJEN ÜRETİMİ, ISITMA VE SOĞUTMA İÇİN KULLANILMASININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ, TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ozan ŞEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ

Bu tezin amacı, jeotermal ve güneş enerjisinin elektrik ve hidrojen üretimi ile birlikte ısıtma ve soğutma için kullanılması amacıyla uygun modellerin geliştirilmesidir. Geliştirilen modellerin termodinamik ve termoekonomik analizlerinin ardından Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak tasarımı ve Genetik Algoritma yöntemi ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, ihtiyaç duyulan farklı enerji formlarının üretilmesinde jeotermal ve güneş enerjisinin en uygun sistem ve sistem kombinasyonları ile uygun çalışma şartlarında kullanılması hedeflenmiştir. Farklı jeotermal kaynak sıcaklıklarında ve güneş ışınımlarında modellerin parametrik analizleri yapılmıştır. Güç, ısıtma ve soğutma üretimini maksimize etmek ve üretilen elektriğin, hidrojenin, ısıtmanın ve soğutmanın birim maliyetlerini de minimize etmek üzere optimizasyon yapılmıştır. Modeller EES, MATLAB ve Aspen Plus programlarında simüle edilmiş ve tüm analizler bu programlar kullanılarak yapılmıştır.

Modellerin analizlerinde jeotermal suyun sıcaklığı 130°C ve kütleli debisi 85 kg/s ile aylık ortalama güneş ışınım şiddeti 600 W/m² olarak alınmıştır. Modellerin termodinamik ve termoekonomik analiz sonuçları üzerinden yapılan YSA ile optimizasyonu sonucunda Model 1'in toplam net güç çıktısı, depolanan hidrojenen şebekeye destek olarak elektrik üretimi ve hidrojen üretimi 4569 kW, 3180 kW ve

0.0185 kg/s hesaplanmıştır. Model 2'nin toplam net güç çıktısı 3061 kW ve soğutma kapasitesi 2761 kW hesaplanmıştır. Model 3'ün toplam net güç çıktısı, depolanan hidrojenin şebekeye destek olarak elektrik üretimi, ısıtma kapasitesi ve hidrojen üretimi 3285 kW, 2252 kW, 10,274 kW ve 0.0154 kg/s olarak hesaplanmıştır. YSA ile optimizasyon sonucunda, Model 1'de üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyeti 0.077 \$/kWh ve 1.921 \$/kg hidrojen olarak hesaplanmıştır. Model 2'de üretilen elektriğin ve soğutmanın maliyeti 0.014 \$/kWh ve 0.052 \$/kWh'dır. Model 3'de üretilen elektriğin, hidrojenin ve ısıtmanın birim maliyeti sırasıyla 0.0778 \$/kWh, 1.491 \$/kg hidrojen ve 0.0050 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

2021, xix + 200 sayfa

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidrojen üretimi, termoekonomi, yapay sinir ağları, optimizasyon.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS MODELING AND THERMOECONOMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF GEOHERMAL AND SOLAR ENERGY USE IN ELECTRICITY AND HYDROGEN GENERATION, HEATING AND COOLING

Ozan SEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ceyhun YILMAZ

The aim of this thesis is to develop suitable models for the use of geothermal and solar energy for electricity and hydrogen production as well as for heating and cooling. After the thermodynamic and thermo-economic analysis of the developed models, the models are designed using Artificial Neural Networks (ANN) and optimized with the Genetic Algorithm method. As a result of this study, it is aimed to use geothermal and solar energy with the most suitable system and system combinations under appropriate operating conditions in the production of different energy forms. Parametric analysis of the models at different geothermal source temperatures and solar radiation are performed. Optimization is performed to maximize the power, heating, and cooling production and minimize the unit costs of electricity, hydrogen, heating, and cooling. The models are simulated in EES, MATLAB, and Aspen Plus programs, and all analyses are performed using these programs.

In the analysis of the models, the temperature and mass flow rate of the geothermal water are 130°C and 85 kg/s, and the monthly average solar radiation is 600 W/m². The total net power output of Model 1, electricity production from stored hydrogen as a support to the grid, and hydrogen production rate is calculated to be 4569 kW, 3180 kW, and 0.0185 kg/s. Model 2 has a total net power output of 3061 kW and a cooling

capacity of 2761 kW. The total net power output of Model 3, electricity production from stored hydrogen as a support to the grid, heating capacity, and hydrogen production rate is calculated to be 3285 kW, 2252 kW, 10,274 kW, and 0.0154 kg/s. As a result of ANN optimization, the unit costs of electricity and hydrogen production in Model 1 are calculated to be 0.077 \$/kWh and 1.921 \$/kg hydrogen. The unit costs of production electricity and cooling in Model 2 are 0.014 \$/kWh and 0.052 \$/kWh. The production costs of electricity, hydrogen, and heating in Model 3 are calculated to be 0.0778 \$/kWh, 1.491 \$/kg hydrogen, and 0.0050 \$/kWh, respectively.

2021, xix + 200pages

Keywords: Geothermal energy, solar energy, hydrogen generation, thermoeconomic, artificial neural networks, optimization.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, alışmaların ynlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez çalışmasını 218M739 proje numarası ile destekleyen TÜBİTAK'a katkılarında dolayı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren ve her daim desteklerini hissettiğim sevgili aileme en büyük teőekkürü bir borç bilirim.

Ozan ŞEN
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Jeotermal Enerji	8
2.2 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretiminde Kullanılan Çevrimler	12
2.2.1 Kondensersiz Kuru Buhar Çevrimi.....	12
2.2.2 Kondenserli Kuru Buhar Çevrimi	13
2.2.3 Tek Püskürtmeli Çevrim	14
2.2.4 Çift Püskürtmeli Çevrim	15
2.2.5 İki Akışkanlı (Binary) Çevrim	16
2.2.6 Birleşik Püskürtmeli Çevrim.....	17
2.3 Güneş Enerjisi.....	18
2.3.1 Güneş Hücreleri	19
2.3.2 Isıl Güneş Teknolojileri ve Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Sistemleri (CSP)	19
2.4 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Yöntemleri.....	23
2.4.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler	24
2.4.1.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler.....	24
2.4.1.2 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik (CPV) Sistemler	25
2.4.2 Yoğunlaştırıcı Güneş Güç (CSP) Sistemleri.....	26
2.4.2.1 Parabolik Oluklu Kollektör (PTC) Sistemleri.....	26
2.4.2.2 Merkezi Alıcı (Güç Kulesi) Sistemleri.....	28
2.4.2.3 Parabolik Çanak Sistemler	29
2.5 Hidrojen Enerjisi.....	30
2.5.1 Hidrojen Üretimi	32

2.6 Yapay Sinir Ağları	35
2.6.1 Ortalama Mutlak Hata (MAE)	37
2.6.2 Ortalama Kare Hata (MSE).....	38
2.6.3 Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	38
2.6.4 Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE).....	39
2.7 Genetik Algoritma	39
2.8 Literatür Özeti.....	43
3. MATERYAL ve METOT	50
3.1 Modellerin Çalışma Prensipleri	52
3.1.1 Model 1'in Çalışma Prensipleri.....	52
3.1.2 Model 2'nin Çalışma Prensipleri.....	55
3.1.3 Model 3'ün Çalışma Prensipleri.....	59
3.2 Modellerin Termodinamik Analizleri	62
3.2.1 Model 1'in Termodinamik Analizi	75
3.2.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termodinamik Analizi	75
3.2.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termodinamik Analizi.....	78
3.2.1.3 Tüm Sistemin Termodinamik Analizi.....	79
3.2.2 Model 2'nin Termodinamik Analizi	79
3.2.3 Model 3'ün Termodinamik Analizi	85
3.3 Modellerin Termoekonomik Analizleri	88
3.3.1 Model 1'in Termoekonomik Analizi	94
3.3.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termoekonomik Analizi	95
3.3.1.2 Jeotermal Enerji Santralinin Termoekonomik Analizi.....	96
3.3.1.3 Elektroliz Ünitesinin ve Yakıt Hücresinin Termoekonomik Analizi... 97	
3.3.2 Model 2'nin Termoekonomik Analizi	98
3.3.3 Model 3'ün Termoekonomik Analizi.....	100
3.4 Modellerin YSA Yöntemi ile Güç ve Maliyet Tahmini	101
3.4.1 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 1 için Güç ve Maliyet Tahmini.....	101
3.4.2 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 2 için Güç ve Maliyet Tahmini.....	103
3.4.3 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 3 için Güç ve Maliyet Tahmini.....	104

3.5 Modellerin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyonu	106
3.5.1 Model 1 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon.....	107
3.5.2 Model 2 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon.....	108
3.5.3 Model 3 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon.....	109
4. BULGULAR	111
4.1 Modellerin Termodinamik Analiz Sonuçları	111
4.1.1 Model 1'in Termodinamik Analiz Sonuçları	111
4.1.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termodinamik Analiz Sonuçları	111
4.1.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termodinamik Analiz Sonuçları	116
4.1.1.3 Tüm Sisteminin Termodinamik Analiz Sonuçları	121
4.1.2 Model 2'nin Termodinamik Analiz Sonuçları	126
4.1.3 Model 3'ün Termodinamik Analiz Sonuçları	135
4.2 Modellerin Termoekonomik Analiz Sonuçları	143
4.2.1 Model 1'in Termoekonomik Analiz Sonuçları	143
4.2.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termoekonomik Analiz Sonuçları	143
4.2.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termoekonomik Analiz Sonuçları	145
4.2.1.3 Elektroliz Ünitesi ve Yakıt Hücresinin Termoekonomik Analiz Sonuçları.....	147
4.2.2 Model 2'nin Termoekonomik Analiz Sonuçları	149
4.2.3 Model 3'ün Termoekonomik Analiz Sonuçları	153
4.3 Modellerin YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları	157
4.3.1 Model 1'in YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları	157
4.3.2 Model 2'nin YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları	161
4.3.3 Model 3'ün YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları	165
4.4 Modellerin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları.....	170
4.4.1 Model 1'in Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları	170
4.4.2 Model 2'nin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları	175
4.4.3 Model 3'ün Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları	179
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	187

6. KAYNAKLAR.....	190
ÖZGEÇMİŞ.....	199

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
H ₂	Hidrojen
O ₂	Oksijen
LiBr	Lityum bromür
H ₂ O	Su
NH ₃	Amonyak
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
MWt	Megawatt ısı
kWh	Kilowatt saat
GWh	Gigawatt saat
\$	Amerikan doları
g	Gram
kg	Kilogram
s	Saniye
P	Basınç
kPa	Kilopascal
MPa	Megapascal
W	Watt
kJ	Kilojoule
MJ	Megajoule
m	Metre
m ²	Metrekare
cm ²	Santimetrekare
mm	Milimetre
\dot{m}	Kütleli debi
h	Entalpi
\dot{E}	Enerji
\dot{Q}	Isı
\dot{S}	Entropi
\dot{W}	İş
\dot{E}_x	Ekserji
T	Sıcaklık
c	Özgül ısı
ψ	Özgül ekserji
η	Enerji verimi
ε	Ekserji verimi
°C	Santigrad derece
K	Kelvin
v	Hacim
M	Molar kütle
ΔG	Tersinir iş

Simgeler (Devam)

ΔS	Entropi farkı
ΔH	Entalpi farkı
V	Volt
D	Çap
A	Alan
L	Uzunluk
G	Güneş ışınım şiddeti
V	Hız
π	Pi sayısı
ρ	Yoğunluk
γ	Kesme faktörü
τ	Cam örtü geçirgenliği
α	Alıcının soğurması
K_r	Geliş açısı değıştiricisi
U	Isı kayıp katsayısı
i	Faiz oranı
n	Ekipmanın ekonomik ömrü
N	Birim yılda işletmenin çalışma saati
\dot{F}	Yakıt
\dot{P}	Ürün
\dot{c}	Birim ekserji maliyeti
\dot{C}	Ekserjiye bağlı maliyet oranı
\dot{Z}^{CI}	İlk yatırım maliyeti
\dot{Z}^{OM}	İşletme ve bakım maliyeti
%	Yüzde

Kısaltmalar

ABD	Amerikan birleşik devletleri
AFJES	Afyon jeotermal enerji santrali
CPV	Optik yoğunlaştırıcılar (Concentrator photovoltaics)
CRF	Sermaye geri kazanım faktörü (Capital recovery factor)
CSP	Yoğunlaştırılmış güneş güç sistemi (Concentrated solar power)
DC	Doğru akım (Direct current)
EES	Mühendislik denklem çözücü (Engineering equation solver)
EIA	Uluslararası enerji ajansı (International energy agency)
ETKB	Enerji ve tabii kaynaklar bakanlığı
GEPA	Güneş enerjisi potansiyeli atlası
GES	Güneş enerji santrali
LAC	Seviyelendirilmiş yıllık maliyet (Levelized annual cost)
LCC	Ömür çevrim maliyeti (Life cycle cost)
LogSig	Logaritmik sigmoid (Logarithm of sigmoid)
MAE	Ortalama mutlak hata (Mean absolute error)
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hata (Mean absolute percentage error)
MSE	Ortalama karesel hata (Mean squared error)

Kısaltmalar (Devam)

NPV	Net mevcut değer (Net present value)
OECD	Ekonomik kalkınma ve işbirliği örgütü (Organisation for economic cooperation and development)
ORC	Organik rankine çevrimi (Organic rankine cycle)
PEC	Ekipman satın alma maliyeti (Purchased equipment cost)
PTC	Parabolik oluklu kollektör (Parabolic trough collector)
PV	Güneş hücresi (Photovoltaic)
RMSE	Kök ortalama kare hata (Root mean square error)
TanSig	Tanjant sigmoid (Tangent of sigmoid)
TÜBİTAK	Türkiye bilimsel ve teknolojik araştırma kurumu
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 1).	5
Şekil 2.2 Türkiye’de tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 1).....	6
Şekil 2.3 Yakıt türlerine göre Türkiye’de kurulu elektrik santrallerinin dağılımı (İnt. Kyn. 2).....	7
Şekil 2.4 Türkiye elektrik üretiminin kullanılan birincil kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 3).....	8
Şekil 2.5 Jeotermal enerji kurulu güç kapasitesinde ilk 10 ülke (İnt. Kyn. 5).	9
Şekil 2.6 Türkiye jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası (İnt. Kyn. 4).	10
Şekil 2.7 Türkiye jeotermal enerji kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 6).....	11
Şekil 2.8 Türkiye’de jeotermal enerjiden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 7).....	12
Şekil 2.9 Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005). 13	13
Şekil 2.10 Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005). 14	14
Şekil 2.11 Tek püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).....	15
Şekil 2.12 Çift püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).....	16
Şekil 2.13 Binary jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).	17
Şekil 2.14 Birleşik püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).	18
Şekil 2.15 PV kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 9).	19
Şekil 2.16 PV kurulu güç kapasitesindeki ilk 10 ülke ve ülkemizin kapasitesi (İnt. Kyn. 9).....	20
Şekil 2.17 CSP kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 9).	21
Şekil 2.18 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (İnt. Kyn. 8).	22
Şekil 2.19 Türkiye’de güneş enerjisinden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 7).....	23
Şekil 2.20 PV sistemler ile elektrik üretiminin şematik resmi (İnt. Kyn. 10).	25
Şekil 2.21 Yoğunlaştırıcı fotovoltaiik sistem tasarımı (İnt. Kyn. 11).	26
Şekil 2.22 Parabolik oluklu kolektör (Cabrera vd. 2013).....	27
Şekil 2.23 Parabolik oluk kollektörlü güneş güç santralının tasarımı (Padilla 2011). ...	28
Şekil 2.24 Enerji kulesi güç sisteminin tasarımı (Karatairi 2018).	29
Şekil 2.25 Parabolik çanak-stirling motor sistemi (Bataneh ve Taamneh 2017).	30
Şekil 2.26 Hidrojen üretiminde kullanılan kaynaklar ve hidrojen enerji sistemi.....	35
Şekil 2.27 Çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA genel yapısı (Koyuncu vd. 2019).	36

Şekil 2.28 Genetik algoritma optimizasyonun genel akışı.....	42
Şekil 3.1 Binary jeotermal enerji santrali ve parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinde üretilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır.	54
Şekil 3.2 Yer altından çıkan sıcak jeotermal akışkan ve parabolik güneş kollektöründe üretilen sıcak su, absorpsiyonlu soğutma sisteminde ısı kaynağı olarak kullanılır ve mahal soğutma yapılır. Binary enerji santralinde üretilen elektrik enerjisi şebekeye verilir.....	58
Şekil 3.3 Jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç santralinde üretilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır. ORC çevriminin ısı değiştiricisinden çıkan jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanı, mahal ısıtma sisteminin ısı değiştiricisinde ısı kaynağı olarak kullanılır ve mahal ısıtma yapılır.....	61
Şekil 3.4 YSA tabanlı Model 1 için blok diyagramı.....	102
Şekil 3.5 YSA tabanlı Model 2 için blok diyagramı.....	103
Şekil 3.6 YSA tabanlı Model 3 için blok diyagramı.....	105
Şekil 4.1 Parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinin ekserji akış diyagramı.....	114
Şekil 4.2 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi. ...	115
Şekil 4.3 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve yararlı enerjinin değişimi.	116
Şekil 4.4 Binary jeotermal santralinin ekserji akış diyagramı.....	119
Şekil 4.5 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.	120
Şekil 4.6 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.	120
Şekil 4.7 Elektroliz ünitesinin ekserji akış diyagramı.....	123
Şekil 4.8 Model 1 geneli için ekserji akış diyagramı.....	123
Şekil 4.9 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.	124
Şekil 4.10 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.	125
Şekil 4.11 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi. .	125
Şekil 4.12 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.	126
Şekil 4.13 Model 2 geneli için ekserji akış diyagramı.....	131

Şekil 4.14 Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak COP değeri ve soğutma kapasitesi.	132
Şekil 4.15 Güneş ışınımına bağlı olarak COP değeri ve soğutma kapasitesi.....	133
Şekil 4.16 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin değişimi.	134
Şekil 4.17 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.	135
Şekil 4.18 Model 3 geneli için ekserji akış diyagramı.	139
Şekil 4.19 Model 3 geneli için ekserji akış diyagramı.	140
Şekil 4.20 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.	141
Şekil 4.21 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.	141
Şekil 4.22 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin değişimi.	142
Şekil 4.23 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.	143
Şekil 4.24 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.	145
Şekil 4.25 Jeotermal akışkan sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.	147
Şekil 4.26 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektrik ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.....	149
Şekil 4.27 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.	152
Şekil 4.28 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.	153
Şekil 4.29 Jeotermal akışkan sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.....	156
Şekil 4.30 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.	157
Şekil 4.31 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.....	158
Şekil 4.32 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.	159
Şekil 4.33 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini yakıt hücresi güç üretim kapasitesinin değişimi.	160
Şekil 4.34 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.	160
Şekil 4.35 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini hidrojen maliyetinin değişimi.	161
Şekil 4.36 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.....	162

Şekil 4.37 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.	163
Şekil 4.38 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini soğutma kapasitesinin değişimi.	164
Şekil 4.39 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.	164
Şekil 4.40 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini soğutma maliyetinin değişimi.	165
Şekil 4.41 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.	166
Şekil 4.42 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.	167
Şekil 4.43 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini yakıt hücresi güç üretim kapasitesinin değişimi.	168
Şekil 4.44 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini ısıtma kapasitesinin değişimi.	168
Şekil 4.45 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.	169
Şekil 4.46 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini hidrojen maliyetinin değişimi.	169
Şekil 4.47 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini ısıtma maliyetinin değişimi.	170
Şekil 4.48 Net güç çıktısı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	171
Şekil 4.49 Net güç çıktısı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	172
Şekil 4.50 Net elektrik miktarı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	172
Şekil 4.51 Net elektrik miktarı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	173
Şekil 4.52 Net güç çıktısı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	175
Şekil 4.53 Net güç çıktısı ve soğutma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	176
Şekil 4.54 Soğutma kapasitesi ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	177
Şekil 4.55 Soğutma kapasitesi ve soğutma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	177
Şekil 4.56 Net güç çıktısı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	180
Şekil 4.57 Net güç çıktısı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	181
Şekil 4.58 Net güç çıktısı ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	181
Şekil 4.59 Net elektrik ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	182
Şekil 4.60 Net elektrik ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	183
Şekil 4.61 Net elektrik ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	183
Şekil 4.62 Isıtma kapasitesi ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	184
Şekil 4.63 Isıtma kapasitesi ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	185
Şekil 4.64 Isıtma kapasitesi ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.	185

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Erdener vd. 2007).	4
Çizelge 2.2 Hidrojen üretim yöntemlerinin metot ve kaynak çeşitlerin göre sınıflandırılması (İnt. Kyn. 12).....	33
Çizelge 2.3 TanSig ve LogSig aktivasyon fonksiyonlarının denklem ve değişim eğrileri (Zhou ve Cao 2018).....	37
Çizelge 2.4 Model başarımlar ölçütleri (Koyuncu vd. 2020).	39
Çizelge 3.1 AFJES'e ait parametreler (Altun ve Kılıç 2020).....	51
Çizelge 3.2 Afyonkarahisar iline ait güneş ışınım değerleri (Hocaoğlu 2011).	51
Çizelge 3.3 Parabolik kollektörün geometrik değerleri.....	76
Çizelge 3.4 Yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali bileşenlerinin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.....	77
Çizelge 3.5 Binary jeotermal enerji santrali bileşenlerinin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.....	78
Çizelge 3.6 Parabolik kollektörün geometrik değerleri.....	81
Çizelge 3.7 Jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji sisteminin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.	82
Çizelge 3.8 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.....	86
Çizelge 3.9 Güneş enerji santralini oluşturan ekipmanların ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.....	96
Çizelge 3.10 Jeotermal enerji santralinin alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.....	97
Çizelge 3.11 Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.....	98
Çizelge 3.12 Model 2 alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.....	99
Çizelge 3.13 Model 3 alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.....	100
Çizelge 3.14 Model 1 için YSA parametreleri.....	102
Çizelge 3.15 Model 2 için YSA parametreleri.....	104
Çizelge 3.16 Model 3 için YSA parametreleri.....	105
Çizelge 3.17 Karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.....	106
Çizelge 3.18 Çok amaçlı optimizasyon sürecinin ayar parametreleri.....	106
Çizelge 3.19 Model 1 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.....	108
Çizelge 3.20 Model 2 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.....	109
Çizelge 3.21 Model 3 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.....	110

Çizelge 4.1	Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler....	111
Çizelge 4.2	Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.	112
Çizelge 4.3	Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler....	117
Çizelge 4.4	Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.	118
Çizelge 4.5	Modelin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler. ...	121
Çizelge 4.6	Model 1'in enerji ve ekserji verimi.	122
Çizelge 4.7	Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler....	127
Çizelge 4.8	Model 2'ye ait enerji ve ekserji verimi ile COP değeri.	129
Çizelge 4.9	Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.	130
Çizelge 4.10	Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler..	135
Çizelge 4.11	Model 3 için enerji ve ekserji verimliliği.	137
Çizelge 4.12	Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.	138
Çizelge 4.13	Güneş enerji santralının satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).	143
Çizelge 4.14	Güneş enerji santralının Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.	144
Çizelge 4.15	Jeotermal enerji santralının satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).	146
Çizelge 4.16	Jeotermal enerji santralının Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.	146
Çizelge 4.17	Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).	148
Çizelge 4.18	Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.	148
Çizelge 4.19	Model 2'nin satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).	150
Çizelge 4.20	Model 2'nin Şekil 3.2'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.	151
Çizelge 4.21	Model 3'ün satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).	153
Çizelge 4.22	Model 3'ün Şekil 3.3'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.	154
Çizelge 4.23	Model 1 için YSA tabanlı performans değerlendirme sonuçları.	158
Çizelge 4.24	Model 2 için YSA tabanlı performans değerlendirme sonuçları.	162
Çizelge 4.25	YSA tabanlı sistemin performans değerlendirme sonuçları.	166
Çizelge 4.26	Model 1 için karar parametrelerinin optimum değerleri.	173

Çizelge 4.27 Model 1 için genetik algoritma optimizasyonu sonuçları.	174
Çizelge 4.28 Model 2 için karar parametrelerinin optimum değerleri.	178
Çizelge 4.29 Model 2 için genetik algoritma ile optimizasyon sonuçları.	179
Çizelge 4.30 Model 3 için karar parametrelerinin optimum değerleri.	186
Çizelge 4.31 Model 3 için genetik algoritma ile optimizasyon sonuçları.	186

1. GİRİŞ

Enerjinin kaynaklardan üretimi yanında verimli kullanımı da oldukça önemlidir. Ülkemiz enerji ihtiyacı artmakta olan bir ülkedir. Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ve uygun mühendislik sistemlerin geliştirtmesi büyük önem arz etmektedir. Afyonkarahisar ilinin jeotermal ve güneş enerji potansiyeli Türkiye ortalamasının üzerindedir. Bu kaynakların enerjinin sık kullanılan formu olan elektrik ve ısı enerjisi üretiminde kullanılması ve uygun mühendislik sistemlerinin geliştirilmesi, büyük önem taşımaktadır. Fosil kaynaklara ilave olarak jeotermal ve güneş enerjisinin elektrik ve ısı enerji formlarının üretiminde kullanılması ve bunun hangi metotlarla yapılacağı önemli araştırma konularından biridir.

Bu tez çalışması kapsamında jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi ile birlikte ısıtma ve soğutma yapılması için kojenerasyon içeren prosesler ve enerjinin farklı formlara dönüştürülmesi ele alınmıştır. Bunlardan biri, üretilen enerjiden ihtiyaç fazlası zamanlarda hidrojen üreterek, elektriği dolaylı olarak depolama yöntemidir. Hidrojen doğal bir enerji kaynağı değildir, enerji taşıyıcısıdır ve birincil enerji kaynakları kullanılarak değişik hammaddelerden üretilebilir. Kullanılan hammaddeler ise su, fosil yakıtlar ve biomas materyalidir. Hidrojenin, sudan ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilmesi temel ilkedir. Hidrojenin üretim yöntemlerinin başında suyun elektrolizi gelmektedir. Elektroliz için gerekli olan elektrik enerjisi fosil yakıtlar, hidroelektrik, nükleer, jeotermal, güneş, rüzgâr ve dalga enerjilerinden temin edilebilir. Elektrik enerjisinin üretimindeki yöntem çok önemlidir. Çünkü amaç enerji üretimi ve kullanımında çevre olan zararların giderilmesi iken, geleceğin enerjisini çevreye zararlı bir yöntemle elektrik üretip elde etmeye çalışmak uygun olmayacaktır. Bu zararlı etkilerin en aza indirilebilmesi için hidrojen üretiminde jeotermal enerji, güneş, rüzgâr ve dalga enerjileri gibi kaynaklar kullanılabilir. Bu tez çalışmasında hidrojen, yenilenebilir enerji kaynağı olan jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak üretilmiştir.

Bu tezin amacı, bir çok enerji formunun gerekli olduğu ve üretilebileceği entegre sistemlerde elektrik üretmek ve aynı zamanda ısıtma-soğutma yapabilmek amacıyla jeotermal ve güneş enerjisinin kullanımı için modeller geliştirmek ve modellerden uygun olanların kapsamlı bir şekilde Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak tasarımı, termoekonomik yöntemler yardımıyla incelenmesi ve optimizasyonunun yapılmasıdır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere üç model geliştirilmiştir. Birinci modelde, jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç çevriminden elde edilen elektrik ihtiyaca göre şebekeye verilmiştir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilmiş ve hidrojen üretilmiş ve depolanmıştır. Şebekede fazla elektriğe ihtiyaç duyulduğunda depolanmış olan hidrojen yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülmüş ve şebekeye verilmiştir. İkinci modelde, jeotermal ve güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisi absorpsiyonlu soğutma sisteminde kullanılarak mahal soğutması yapılmıştır. Çevrimi terk eden sıcak jeotermal akışkan ve atık ısı organik Rankine çevriminde (ORC) elektrik üretmek için kullanılmıştır. Elde edilen elektrik ihtiyaca göre şebekeye verilmiştir. Üçüncü modelde, jeotermal ve güneş enerjisinden elde edilen enerji ORC çevriminde elektrik üretmek için kullanılmıştır. Üretilen elektrik güç kontrol ünitesine gönderilerek ihtiyaca göre şebekeye verilmiştir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilmiş, hidrojen üretilmiş ve depolanmıştır. Şebekede fazla elektriğe ihtiyaç duyulduğunda depolanmış olan hidrojen yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülmüş ve şebekeye verilmiştir. Aynı zamanda ORC çevriminden atılan atık ısı merkezi mahal ısıtmasında kullanılmıştır.

Ayrıca modeller üzerine parametrik çalışmalar yapılarak, farklı jeotermal kaynak sıcaklıklarında ve değişen güneş ışınımalarında model performans parametrelerinin değişimi araştırılmıştır. Geliştirilen sistemlerin bilgisayar ortamında EES, MATLAB ve Aspen Plus programları yardımıyla simülasyonu ve termodinamik modellemesi yapılmıştır. Ayrıca, tüm analizlerin bu programlar yardımıyla yapılabilmesi için gerekli parametreler ve kodlar tarafımızdan sağlanmıştır. YSA yöntemi kullanılarak modellerin güç ve maliyet tahminleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modellerin termodinamik ve termoekonomik analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar üzerinde genetik algoritma metodu kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Son olarak modellerin kendi içinde genel bir performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak dünya genelinde enerji ihtiyacı da hızla artmaktadır. Bu gelişmeler ile günümüzde kullanılmakta olan fosil kökenli enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Bu süreç araştırmacıları enerji ihtiyacının karşılanmasında, alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Petrol krizinin ve çevre sorunlarının etkisi ile fosil kökenli enerji kaynaklarının yerini alabilecek alternatif enerji kaynakları düşünülmesi gerekmektedir. Dünyadaki petrol rezervlerinin aşırı tüketim sonucu azalması ve buna bağlı olarak fiyatların artması, ayrıca insan sağlığına ve çevreye vermiş olduğu zararlar da araştırmacıları doğada bol miktarda bulunan ve çevreci olan alternatif enerji kaynakları üzerinde araştırma yapmaya sevk etmektedir. Fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanımıyla açığa çıkan emisyonların insan sağlığına, ekolojik dengeye ve çevreye verdiği zararların çok büyük boyutlara ulaşması, tüm dünya ülkelerini bu konuda ciddi önlemler almaya sevk etmiştir. Bunun için bilim dünyasındaki araştırmacılara çevre dostu olan alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanımını geliştirmek için destekler verilmektedir.

Enerji, üretimde zorunlu bir temel faktör olup bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtmakta olan temel parametrelerden biridir. Enerji tüketimiyle sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki olup, ekonomik gelişme ve refah artışıyla enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir. Nitekim ülkemizin enerji ihtiyacının ekonominin büyümesiyle geçen yıla oranla %10 civarında arttığı ifade edilmektedir (Yeni enerji 2014). Her yıl ülkemize enerji talebi açısından bir ülke daha ekleniyor diyebiliriz. Günlük yaşamda her alanda kullanım bulan enerji; kimyasal, nükleer, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal (ısı), jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgâr, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir. Ekonomik anlamda değişik yöntemlerle enerji elde edilen kaynaklar, enerji kaynakları olarak isimlendirilmekte ve değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Kullanışlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılırken; dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları birincil (petrol gibi) ve ikincil (hidrojen gibi) enerji kaynakları şeklinde incelenmektedir (Çizelge 2.1). Yenilenemez enerji kaynakları, kısa bir gelecekte tükenebileceği

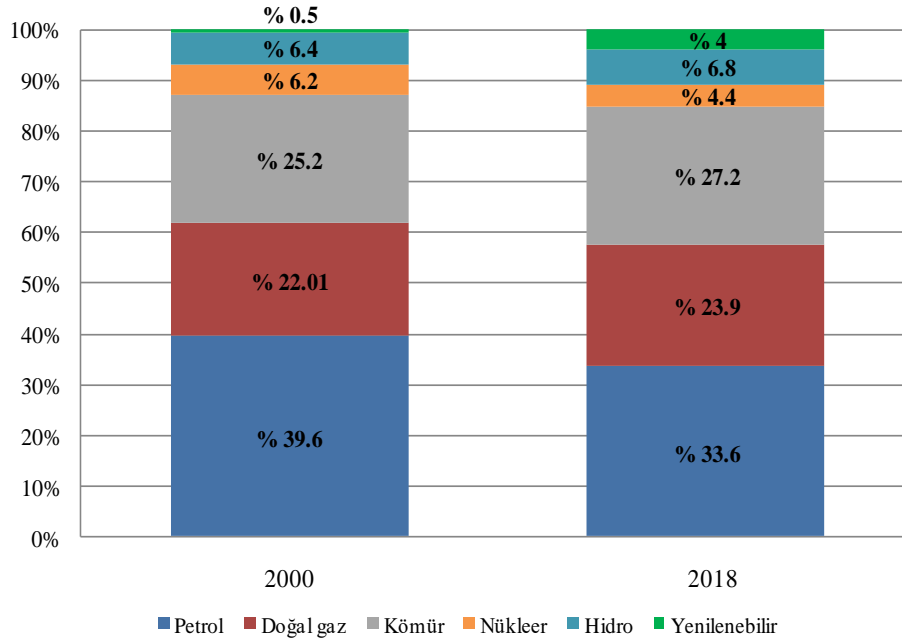
öngörülen enerji kaynakları olup fosil kaynaklılar ve çekirdek kaynaklılar olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise; oldukça uzun sayılabilecek bir gelecekte tükenmeden kalabilecek, kendisini yenileyebilen kaynakları ifade etmektedir (Erdener vd. 2007).

Çizelge 2.1 Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Erdener vd. 2007).

ENERJİ KAYNAKLARI	
Kullanışlarına Göre	Dönüştürülebilirliklerine Göre
A. Yenilenemez	I. Birincil
Fosil kaynaklı	Kömür
Kömür	Petrol
Petrol	Doğal gaz
Doğal gaz	Nükleer
Çekirdek kaynaklı	Biyokütle
Uranyum	Hidrolik
Toryum	Güneş
	Rüzgâr
	Gel-Git
B. Yenilenebilir	II. İkincil
Hidrolik	Elektrik
Güneş	Benzin, Mazot, Motorin
Biyokütle	İkincil kömür
Rüzgar	Kok, petrokok
Jeotermal	Hava gazı
Gel-Git	Hidrojen
Hidrojen	

Günümüzde, küresel büyümeyi forse eden gelişmekte olan ülke ekonomileri, enerji talebine de yön vermektedir. ABD merkezli EIA'nın tahminlerine göre 2050 yılında küresel enerji talebi, 2018'e kıyasla %50 artış gösterecek. Bu devasa artışın ana kaynağının ise OECD üyeleri dışındaki ülkeler olacağı öngörülmüyor. Bu ülkelerdeki güçlü ekonomik büyüme trendinin artan nüfusla birleştiğinde yaratacağı talebin hangi yollarla karşılanması gerektiği ise bugün yanıtlanması gereken bir soru olarak öne

çıkıyor. Tüketilen enerjinin kaynakları irdelendiğinde, petrol, doğalgaz ve kömür üçlüsünün mutlak hâkimiyetinin devam ettiği görülüyor. 2000 yılında tüketilen enerjinin %87'si bu üç kaynaktan elde edilirken, 2018 yılına gelindiğinde buranın %85 olduğu görülmektedir (Şekil 2.1). Bu genel çerçevede, nükleer enerjinin payı azalırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında önemli bir artış göze çarpmaktadır (İnt. Kyn. 1).

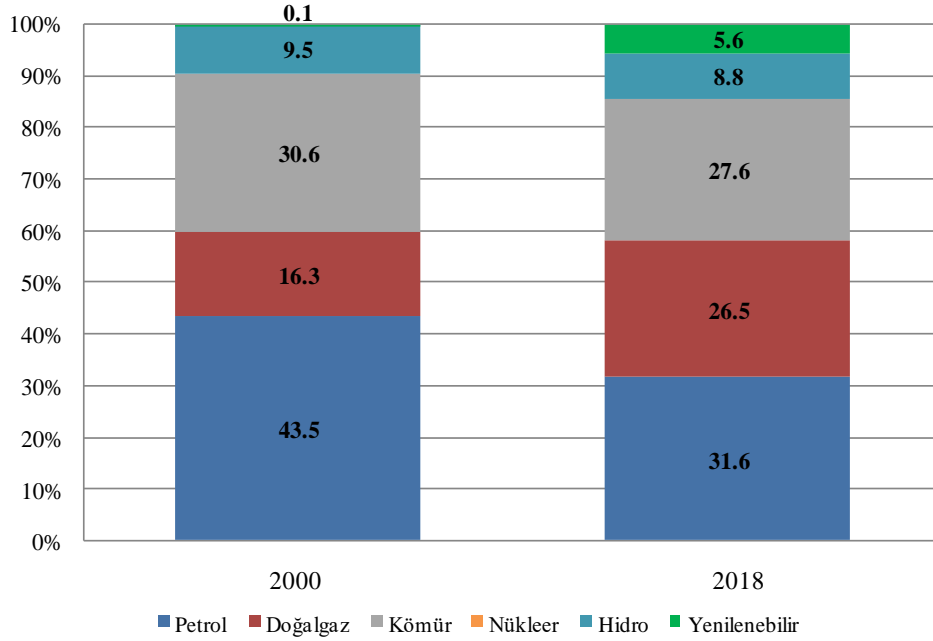


Şekil 2.1 Tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 1).

Yenilenebilir enerjinin toplam içinden aldığı payın hızla büyümesi, henüz genel çerçeveyi değiştirmemekle birlikte, güçlü bir trendin ipuçlarını taşımaktadır. Hükümetlerin desteği, ilerleyen teknoloji ve tüketicilerin giderek daha fazla bilinçlenmesi objektifiyle bir araya geldiğinde, ilerleyen yıllarda daha güçlü bir büyüme seyri izleyeceğimiz neredeyse kesindir. Bu değişkenlere, enerji arz güvenliği ve kaynaklara erişimle ilgili potansiyel sıkıntılar da eklendiğinde genel görünüm daha net tahmin edilebilir hale gelmiştir.

Türkiye, gelişmekte olan bir ekonomi olmasının da etkisiyle dünya ortalamasından daha hızlı büyüyen bir ülke konumundadır. Yenilenebilir enerjinin toplam pastadan aldığı pay 2000 yılında %0.1 iken, 2018 yılında bu oran %5.6'ya yükselmiştir (Şekil 2.2).

Yenilenebilir enerji tarafındaki bu hızlı iyileşme, özellikle güneş kaynakları oldukça bol olan ülkemizdeki potansiyeli ve yönelimi ortaya koymasından önemlidir. Diğer yandan, yenilenebilir enerji yatırımlarının birim maliyetlerinin teknolojik gelişmeler doğrultusunda ucuzlamaya devam etmesi ve devletin bu alana sunduğu destekler bu büyüme trendinin devam edeceğinin önemli bir teminatı niteliğindedir.

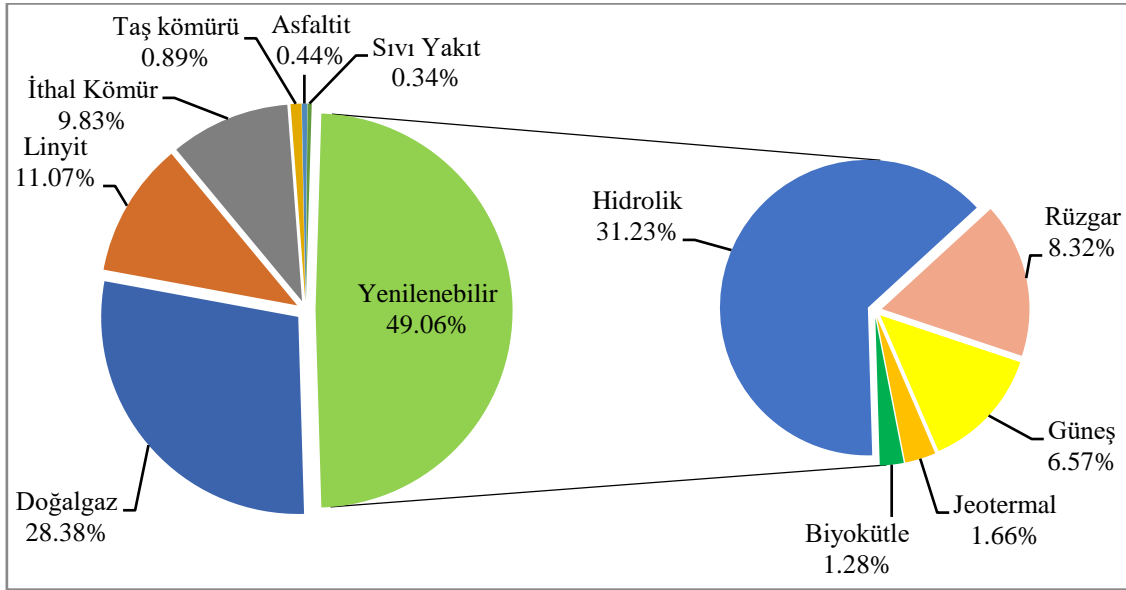


Şekil 2.2 Türkiye’de tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 1).

Türkiye, enerji kullanımı ve talebi her yıl artan bir ülke olması sebebiyle bu alanda önemli yatırımlara ev sahipliği yapmaya devam etmektedir. Dışa bağımlılığın azaltılma arzusuyla desteklenen bu yatırımlar ile 1980’li yılların ortasında 10,000 MW’ın altında olan elektrik üretim santrallerinin kurulu güç, 2019 yılı sonu itibarıyla 91,300 MW seviyesine yükseltildi. 2009 - 2019 yılları arasındaki 10 yıllık dönemdeki kurulu güç artışı ise iki kattan fazla olmuştur. Türkiye Elektrik İletim A.Ş.’nin planlarına göre, kurulu güç kapasitesinin 2023 yılında 109,500 MW seviyesine yükseltilmesi hedeflenmektedir (İnt. Kyn. 1).

2019 yılı sonuna göre ülkemizdeki kurulu güç kapasitesinin kaynaklarına bakıldığında ise toplam hacmin yarısından fazlasının doğalgaz ile çalışan ve hidrolik santrallerden geldiği görülmektedir. Kurulu güç kapasitesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının

toplam payı ise %49'dur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kendi içindeki dağılımı incelendiğinde, hidrolik enerji santrallerinin %31.2'lik payla birinci sırayı aldığı görülmektedir. İkinci sırada %8.3'lük payla rüzgar enerji santralleri, üçüncü sırada %6.6'lık payla güneş enerji santralleri, ardından %1.7'lik payla jeotermal enerji santralleri ve son sırada %1.2'lik payla biyokütle enerji santralleri gelmektedir (Şekil 2.3).

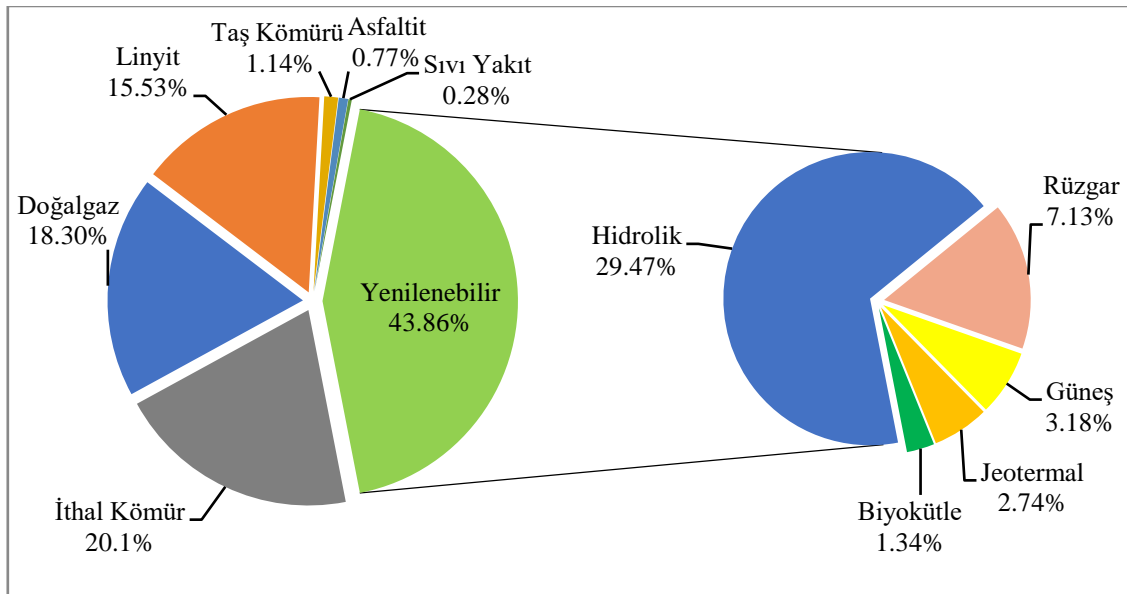


Şekil 2.3 Yakıt türlerine göre Türkiye'de kurulu elektrik santrallerinin dağılımı (İnt. Kyn. 2).

Ülkemizde elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde, 2000 yılında %75.2 olan fosil kaynaklar payının 2007-2009 yılları arasında %80 seviyesinin üzerine çıktığı ancak daha sonra değişik oranlarda seyrettiği ve 2019 yılında %57.5 düzeyine gerilediği görülmektedir. Doğal gazın payı 2014 yılından sonra hızla azalmaya başlamış, bunun tersine rüzgâr kaynağından elektrik üretimi ise hızla artmaya başlamıştır. Kömürden elektrik üretiminin payı ise toplam elektrik üretimi içinde 2013 yılından itibaren yavaş olsa da artarak devam etmiştir. Kömür kaynağından elektrik üretiminin artması, ağırlıklı olarak ithal kömür yakan tesis sayılarının artmasından kaynaklanmaktadır. 2014 yılı itibarıyla güneş enerjisi santralleri de kurulmaya başlamıştır. Bu santrallerin birçoğu çok küçük ölçeklidir ve kurulu güçleri 1 MW'ın altında olduğu için lisans almadan kurulmuşlardır. 2016 yılında bu yatırımlar oldukça fazla miktarda artmaya başlamıştır. Şimdilik elektrik sistemi üzerinde etkileri fazla

hissedilmese de gözlemlenen artış eğilimi ile yakın zamanda toplam kapasitelerinin büyük miktara ulaşabileceği ve elektrik sisteminde etkilerinin görülmeye başlanacağı söylenebilir.

2019 yılı toplam elektrik üretiminde doğal gazın payı bir önceki yıla göre belirgin bir şekilde azalarak %30.3'ten %18.3 seviyesine gerilemiş, kömürün payı bir önceki yıla göre aynı kalmıştır. Uzun yıllardır Türkiye toplam elektrik üretiminin içinde hidrolik kaynak payı genellikle %20-%25 aralığında iken 2019 yılında su gelirlerinin bir önceki yıla göre %60 artması sonucu 2019 yılında %29.5'e yükselmiştir (Şekil 2.4). Son 3 yılda rüzgâr, jeotermal ve güneşten üretilen elektrik önemli miktarda artmaya başlamış ve 2019 yılında bunların toplam payı, toplam üretimin %13.1 seviyesine ulaşmıştır. 2019 yılı elektrik üretiminde rüzgârın payı %7.13, güneşin %3.18, jeotermalin %2.74 ve biyokütlenin payı %1.34 olmuştur (İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.4 Türkiye elektrik üretiminin kullanılan birincil kaynaklara göre dağılımı (İnt. Kyn. 3).

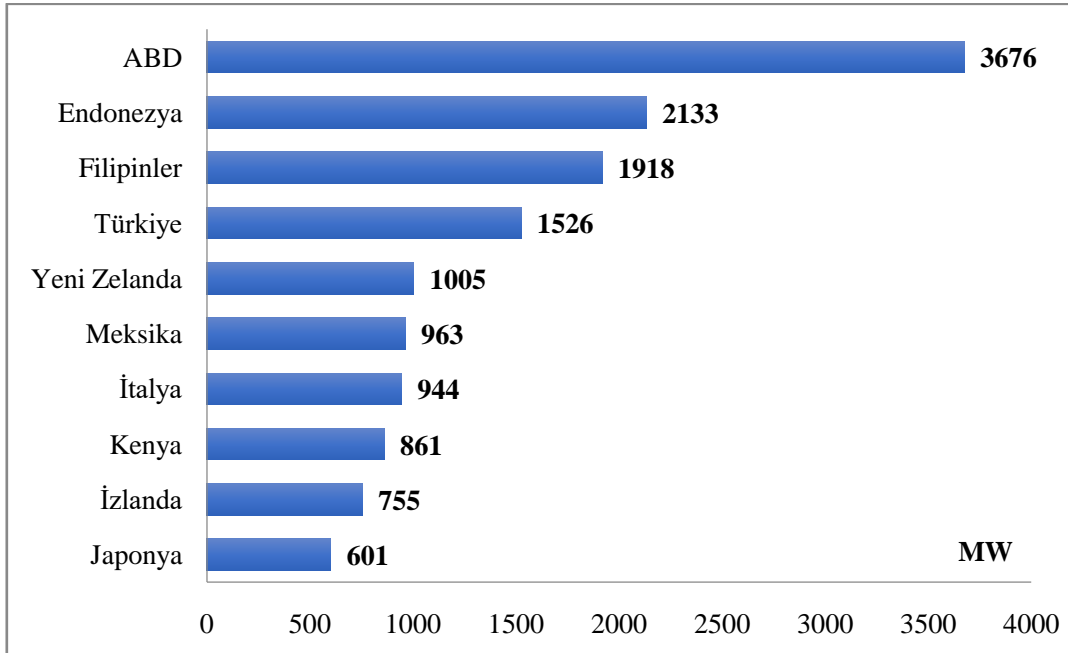
2.1 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısı ve basıncın oluşturduğu sıcaklıkların; bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla çözülmüş mineraller, çeşitli

tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su, buhar ve gazlar ile yüzeye taşınan ısı enerjisidir (İnt. Kyn. 4).

Dünyada toplam jeotermal enerji kurulu gücü, 2018 yılı sonuna göre 759 MW artış göstererek 2019 yılı sonunda 15,406 MW seviyesine ulaşmıştır. Jeotermal enerjiden güç üretim kapasitesinde ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklindedir. Elektrik dışı kullanım ise 70,000 MWt'ı aşmış olup dünyada doğrudan kullanım uygulamalarındaki ilk 5 ülke ise ABD, Çin, İsveç, Belarus ve Norveç'tir. Önümüzdeki 5 yıllık dönemde, devam eden gelişmeler ile enerji üretim kapasitesinde 4500 MW'lık bir gelişme öngörülmektedir (İnt. Kyn. 5).

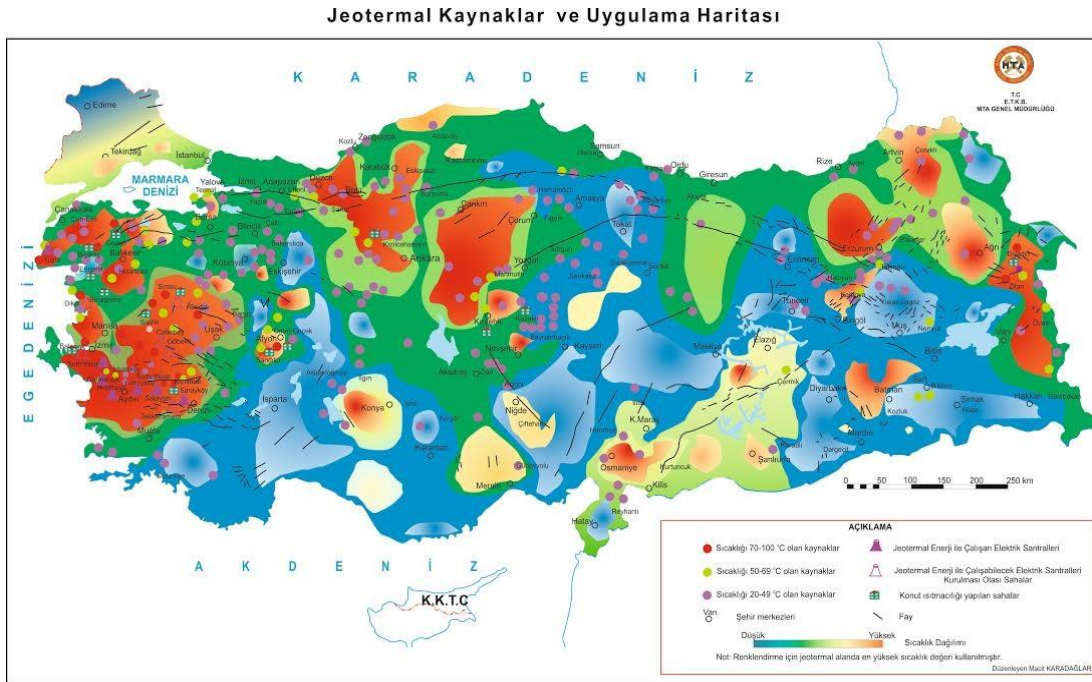
2019 yılı sonuna göre, dünya genelinde 3676 MW jeotermal enerji kurulu gücü ile ABD ilk sırada yer almaktadır. Türkiye 1526 MW kurulu güç kapasitesi ile dördüncü sıradadır. Ülkemizin jeotermal enerji yatırımlarındaki kurulu gücünün 2020 yılı sonunda 1700 MW'a ulaşması beklenmektedir. Türkiye istikrarlı yatırımlarla kısa sürede ilk üçe girmeyi hedeflemektedir. 2019 yılı sonu verilerine göre, jeotermal enerji kurulu gücünde ilk 10 ülkenin sıralaması Şekil 2.5' de verilmiştir.



Şekil 2.5 Jeotermal enerji kurulu güç kapasitesinde ilk 10 ülke (İnt. Kyn. 5).

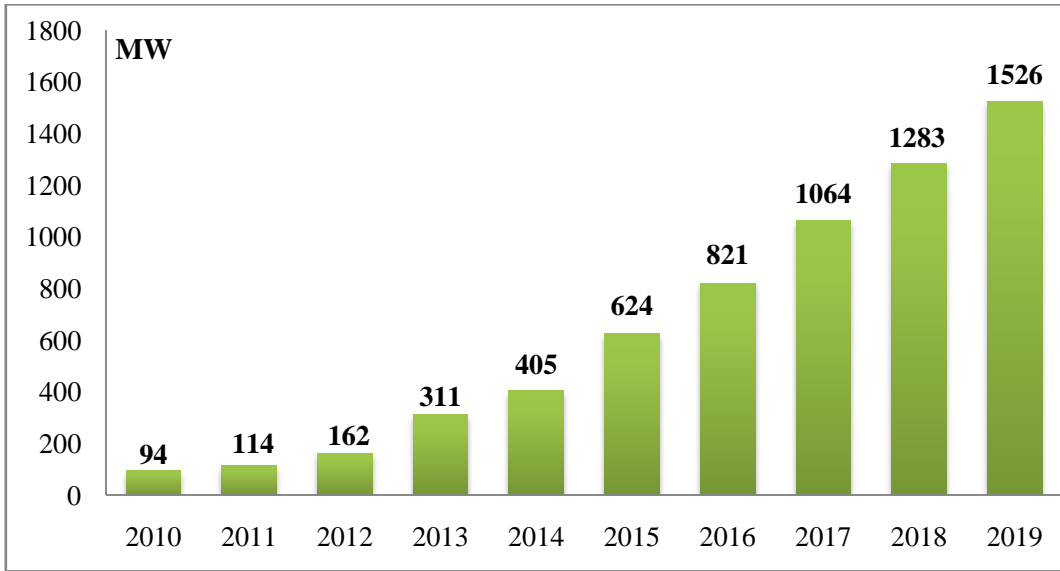
Bilindiği gibi jeotermal enerji, yenilenebilir, temiz, ucuz ve çevre dostu olan yerli bir yeraltı kaynağıdır. Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumu itibarı ile aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır. Ülkemizin her tarafında yayılmış yaklaşık 1000 adet doğal çıkış şeklinde değişik sıcaklıklarda jeotermal kaynaklar mevcuttur.

Ülkemizin jeotermal potansiyeli oldukça yüksek olup potansiyel oluşturan alanların %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, çeşitli endüstriyel uygulamalar vb.) için, %10'u ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur (Şekil 2.6). Jeotermal kaynakların arama ve ortaya çıkarılması çalışmaları MTA Genel Müdürlüğü tarafından 1962 yılında başlatılarak bugüne kadar getirilmiş olup 287.5°C sıcaklığa kadar ulaşan yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar keşfedilmiştir. Jeotermal kaynaklarımızın %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, çeşitli endüstriyel uygulamalar vb.) için, %10'u ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur (İnt. Kyn. 4).



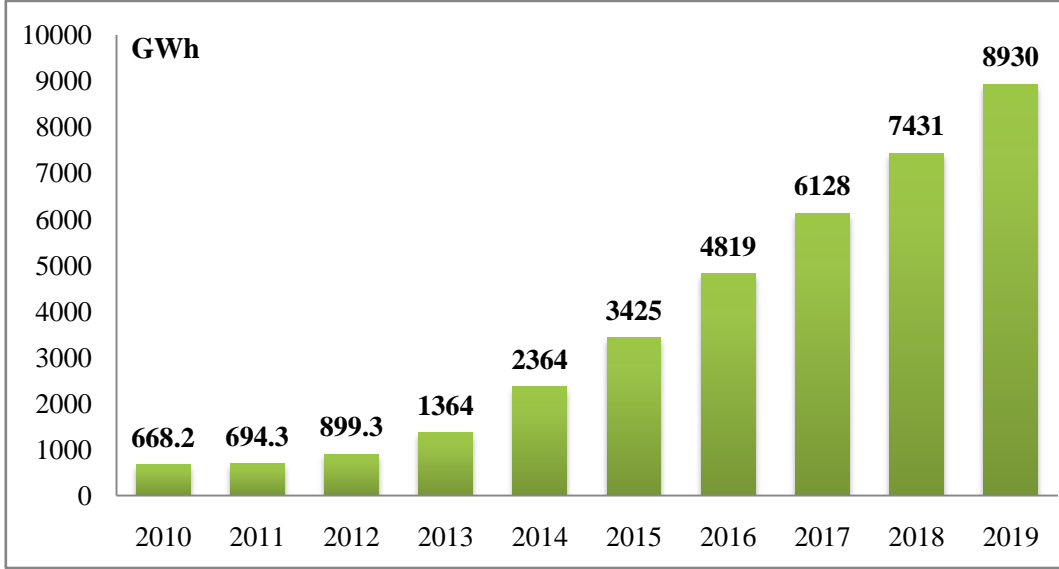
Şekil 2.6 Türkiye jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası (İnt. Kyn. 4).

Türkiye 2010 yılında 94 MW olan jeotermal enerji kurulu güç kapasitesini, 2017 yılında 1000 MW üzerine çıkarmayı başarmış ve 2019 yılı sonunda 1526 MW kurulu güç kapasitesine ulaşmıştır. Türkiye 2019 yılı sonunda jeotermal kurulu güç kapasitesini, bir önceki yıla göre yaklaşık %20 oranında arttırmıştır. Türkiye 2020 yılı sonunda jeotermal enerji kurulu güç kapasitesini 1700 MW'a, 2023 yılında ise kurulu güç kapasitesini 3000 MW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Ülkemiz ilk 10 jeotermal enerji kurulu güç kapasitesine sahip ülkeler sıralamasında şuanda dördüncü sırada yer almaktadır ve hedeflediği güç kapasitelerine ulaşması durumunda dünya genelinde ilk üçe girecektir. Türkiye'nin jeotermal enerji kurulu güç kapasitesindeki başarılı bir şekilde yükselişi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Türkiye jeotermal enerji kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 6).

Ülkemizin elektrik üretiminde, jeotermal enerjinin payı her geçen yıl giderek büyümektedir. Ülkemizde 2012 yılında jeotermal enerjiden üretilen elektrik 1000 GWh'in altında iken, 2019 yılında jeotermal enerjiden üretilen elektrik 8930 GWh'e ulaşmıştır. 2018 yılında elektrik üretiminde jeotermal enerjinin payı %2.44 iken, 2019 yılında %2.74 seviyelerine ulaşmıştır. Türkiye'de jeotermal enerjiden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



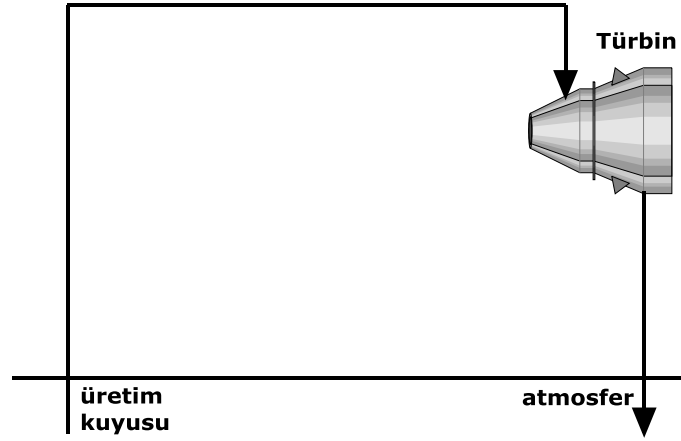
Şekil 2.8 Türkiye’de jeotermal enerjiden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 7).

2.2 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretiminde Kullanılan Çevrimler

Çıkarılan jeotermal akışkanın faz haline bağlı olarak elektrik üretimi için çeşitli çevrimler kullanılır. Türbinin bir enerji kaynağını, mekanik enerjiye çevirmesi için buhar kullanılır. Alınan buharın direk rezervuarlardan gelen akışkan olması durumu ya da kullanılan akışkanın farklı olması durumuna göre çeşitli çevrimler geliştirilmiştir (Öztemir 2011). Bu çevrimler; kondensersiz ve kondenserli kuru buhar çevrimleri, tek ve çift püskürtmeli çevrimler ile iki akışkanlı ve birleşik püskürtmeli/iki akışkanlı çevrim şeklindedir.

2.2.1 Kondensersiz Kuru Buhar Çevrimi

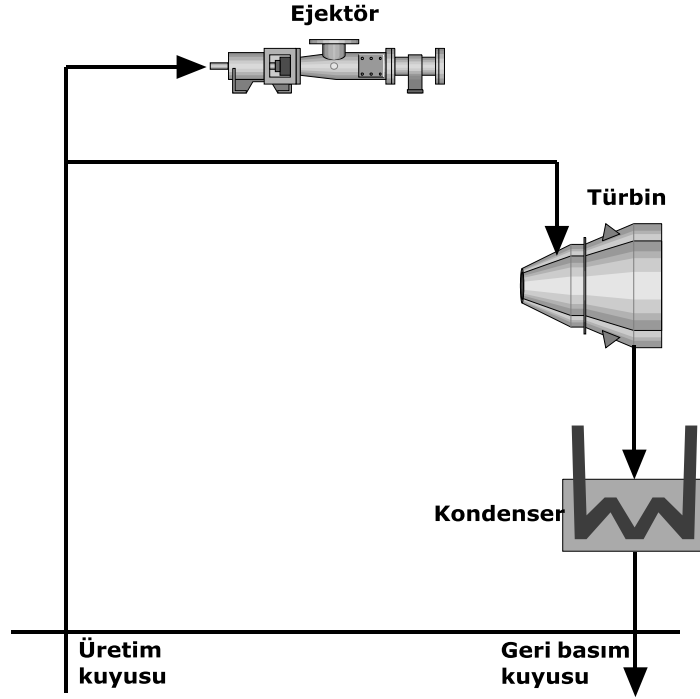
En basit ve en ekonomik jeotermal çevrim kondensersiz kuru buhar çevrimidir. Bu çevrimde, jeotermal kuyudan çıkarılan buhar bir türbinden geçtikten sonra atmosfere atılır. Türbinin çıkışı doğrudan atmosfere açık olduğundan buhar, türbini atmosfer basıncında terk eder. Bu çevrimin avantajı kondenser olmadığı için santralin yapım ve işletme masraflarının kondenserli santrallere göre daha az olmasıdır. Bu çevrimin istenmeyen bir sonucu ise jeotermal buharın doğrudan atmosfere atılmasının çevre kirliliğine yol açmasıdır. Şekil 2.9’ da santralin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9 Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.2.2 Kondenserli Kuru Buhar Çevrimi

Kondenserli kuru buhar çevrimlerinde, türbinin çıkışında kondenser bulunur (Şekil 2.10). Jeotermal buhar türbinden geçtikten sonra bir kondensere girer. Kondenserde yoğuşturulan buhar ideal olarak geri basılır veya atık olarak bir ırmağa veya göle dökülür. Kondenser sayesinde türbinin çıkışında atmosfer basıncının altında bir basınç yani vakum oluşturulur. Buhar, türbini daha düşük basınçta ve daha düşük sıcaklıkta dolayısıyla daha düşük bir entalpide terk eder. Böylece buharın ısı enerjisinin daha büyük bir oranı güce çevrilmiş olur. Bu nedenle kondenserli kuru buhar çevrimleri kondensersiz olanlardan benzer şartla altında daha çok elektrik üretirler. Fosil yakıtlı buharlı elektrik santrallerinde türbin çıkış basıncının atmosfer basıncının çok altında tutulması aynı nedendir.



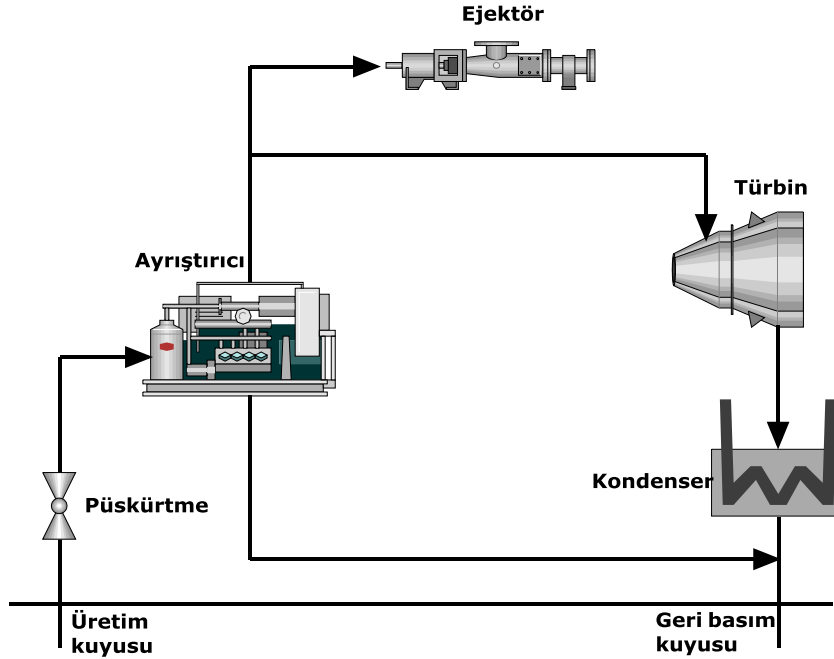
Şekil 2.10 Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.2.3 Tek Püskürtmeli Çevrim

Üretilen jeotermal akışkanın tamamen buhar fazında olması yaygın değildir. Çıkarılan jeotermal akışkan genellikle doymuş sıvı-buhar karışımıdır. Bu durumlarda buhar yüzdesi yeterince yüksekse buhar sıvıdan ayrıştırılır ve buhar türbine gönderilirken kalan sıvı geri basılır. Buhar yüzdesinin düşük olduğu veya jeotermal akışkanın tamamen sıvı fazında olduğu durumlarda püskürtmeli buhar çevrimleri kullanılır. Püskürtme işlemi kısılma vanalarının çalışma prensibine göre püskürtme havuzu adı verilen bir yerde gerçekleştirilir. Püskürtme odasında jeotermal akışkanın basıncı düşürülür. Bu işlem sabit entalpide gerçekleşir. Jeotermal akışkanın püskürtme odasının çıkışında basıncın daha düşük fakat entalpinin girişteki akışkanla aynı olması dolayısıyla sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır. Püskürtme işleminden sonra jeotermal akışkanın sıcaklığı düşer.

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, buhar sıvıdan ayrıştırıldıktan sonra buhar türbine elektrik üretmek için gönderilirken kalan sıvı geri basılır. Türbinden çıkan buhar bir soğutma kulesinde veya püskürtme havuzunda elde edilmiş soğutma suyu ile yoğuşturulur ve

geri basılır. Jeotermal santralin bulunduğu yerde ırmak ve göl gibi bir soğuk su kaynağı varsa kondenserde bu su da kullanılabilir. Bütün kondenserli jeotermal buhar çevrimlerinde kondenserlerde vakum oluşturmak için buhar ejektörleri kullanılır. Belli miktarda buhar ejektörlerde tüketilir.

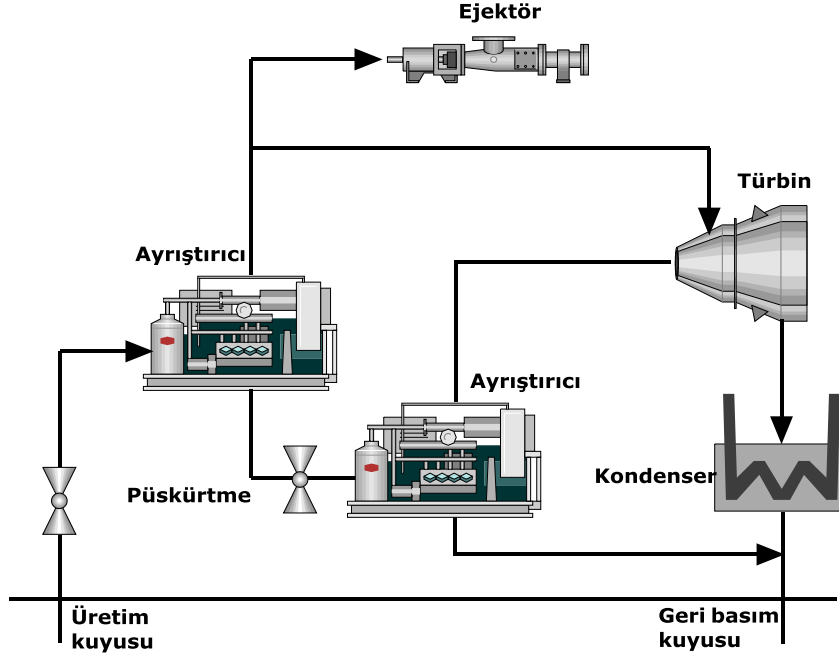


Şekil 2.11 Tek püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.2.4 Çift Püskürtmeli Çevrim

Üretilen jeotermal akışkanın sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda püskürtme işlemi birden fazla tekrarlanabilir. İlk püskürtmeden sonra elde edilen buhar türbine gönderildikten sonra kalan sıvının basıncı veya sıcaklığı hala yüksek ise bu sıvı ikinci bir püskürtme havuzunda tekrar püskürtülür (Şekil 2.12). Sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır ve bu buhar türbine gönderilir. İkinci püskürtmeden elde edilen buharın basıncı ilk püskürtmeden elde edilen buhar basıncından daha düşük olduğundan düşük basınçlı buharın, türbine daha düşük bir basınç kademesinde alınması sağlanır. Alternatif olarak santralde düşük basınçlı buhar için ikinci bir türbin kullanılabilir. Püskürtme sayısına göre jeotermal çevrim tek püskürtmeli ve çift püskürtmeli olarak adlandırılırlar. İkinci püskürtme, çevrimden elde edilecek gücü arttırmakla birlikte beraberinde gelen ek yatırım ve işletme masrafları dikkate alındığında ekonomik

olmayabilir. Pratikte çift püskürtmeli jeotermal santrallere rastlanmakla beraber ikiden fazla püskürtme ekonomik olmadığı için uygulanmamaktadır.



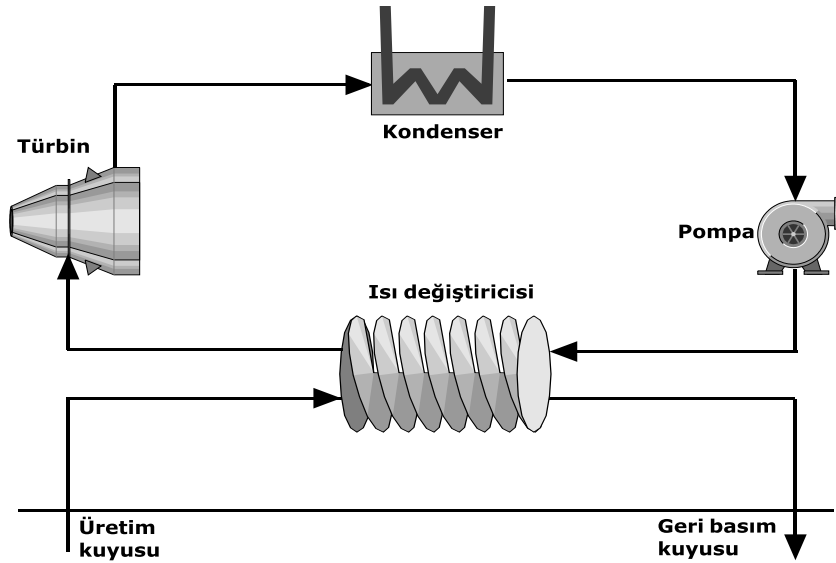
Şekil 2.12 Çift püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.2.5 İki Akışkanlı (Binary) Çevrim

Düşük sıcaklıkta (genellikle 170°C 'nin altı) ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde binary çevrimi kullanılır (Şekil 2.13). Bu çevrimde türbinden geçen aracı akışkan jeotermal buhar olmayıp, ikincil akışkan adı verilen ve kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından çok daha düşük olan bir akışkandır. Bu çevrimde jeotermal akışkan çevrimin ısı kaynağını oluşturur. İzobütan, izopentan, pentan ve R-114 jeotermal ikincil çevrim santrallerinde yaygın olarak kullanılan ikincil akışkanlardır.

Jeotermal akışkan kuyu başındaki basıncın yeterince yüksek tutulmasıyla tercihen % 100 sıvı olarak üretilir. Bunun nedeni akışkan akışı için gerekli olan pompa gücünün sıvı fazında daha düşük olması ve pompaların genelde sadece sıvı fazı için tasarlanmış olmasıdır. Jeotermal akışkan bir ısı değiştiricisinden geçirilir ve jeotermal akışkanın ısı enerjisi ısı değiştiricisine diğer uçtan giren ikincil akışkana transfer edilir. Jeotermal

akışkan ısı değiştiricisini düşük sıcaklıkta terk eder ve geri basılır. İkincil akışkan ısı değiştiricisinde ısınır ve tamamen buharlaşır ve ısı değiştiricisini doymuş buhar veya hafifçe kızmış buhar olarak terk eder. İkincil akışkan türbinden geçer ve ısıl enerjisi dönen mil mekanik gücüne çevrilir. Türbinin mili jeneratörün milini çevirerek mekanik gücün elektriğe dönüşmesini sağlar. Türbini düşük sıcaklıkta ve basınçta terk eden ikincil akışkan kondenserde yoğuşturulur. Daha sonra bir pompa yardımıyla basıncı tekrar ısı değiştiricisi basıncına yükseltilek ısı değiştiricisine yönlendirilir. Böylece ikincil akışkan termodinamik anlamıyla bir çevrimi tamamlamış olur. İkincil akışkanın tamamladığı bu çevrim aslında Rankine çevrimidir. Jeotermal akışkanın bu santraldeki fonksiyonu sadece Rankine çevrimine ısıl kaynak oluşturmaktır. İkincil akışkanın termodinamik ve kritik özellikleri ikincil jeotermal çevrimlerin performanslarını etkiler. Bu yüzden, belli bir jeotermal kaynaktan en fazla gücün üretilmesi için en uygun ikincil akışkanın seçilmesi gerekir.

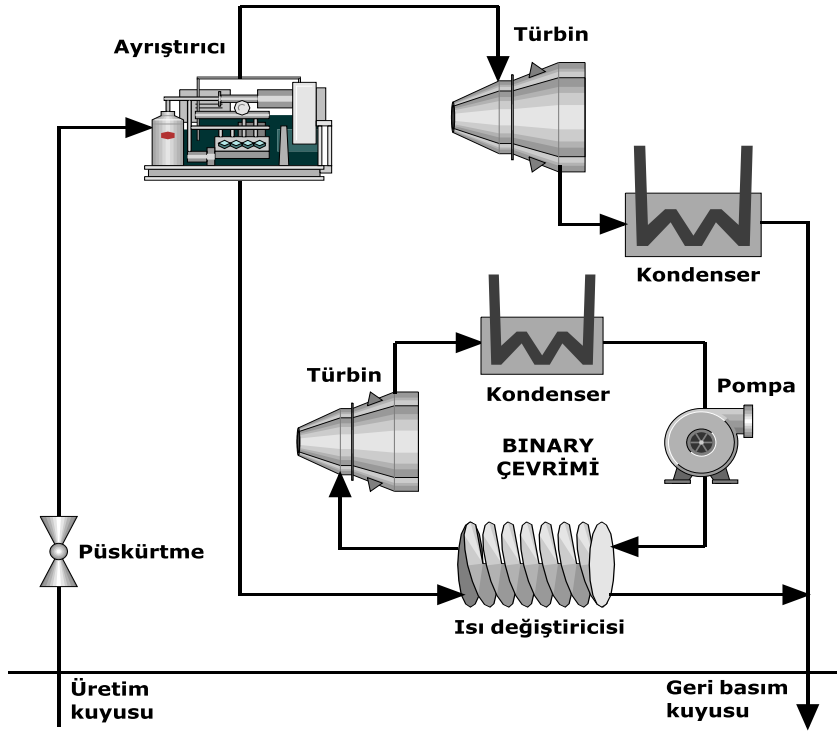


Şekil 2.13 Binary jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.2.6 Birleşik Püskürtmeli Çevrim

Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde özellikle son 20 yılda popüler olan bir çevrim birleşik püskürtmeli/iki akışkanlı çevrimdir (Şekil 2.14). Bu çevrim hem püskürtmeli hem iki akışkanlı çevrimlerin avantajlarından aynı anda yararlanmayı amaçlar. Bu çevrim yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için uygundur ve bu özelliğiyle çift

püskürtmeli çevrimlere bir alternatif oluşturur. Jeotermal akışkan püskürtme havuzunda püskürtüldükten sonra elde edilen buhar bir buhar türbininden geçer ve elektrik elde edilir. Kondenserde yoğuşturulan jeotermal akışkan geri basılır. Püskürtme havuzundan çıkan jeotermal sıvı ikincil çevrimin ısı değiştiricisinden geçerek ısıl enerjisini ikincil akışkana transfer eder ve geri basılır. İkincil akışkan ikincil çevrimin türbininden geçerek elektrik elde edilir ve ikincil çevrim tamamlanır (Kanoğlu 2005).



Şekil 2.14 Birleşik püskürtmeli çevrim jeotermal elektrik santrali (Kanoğlu 2005).

2.3 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışınım enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir (İnt. Kyn. 8).

Günümüzde güneş enerjisinden çok farklı biçimlerde ve alanlarda yararlanılmasıyla birlikte elektrik enerjisi üretiminde genelde iki farklı teknoloji kullanılmaktadır.

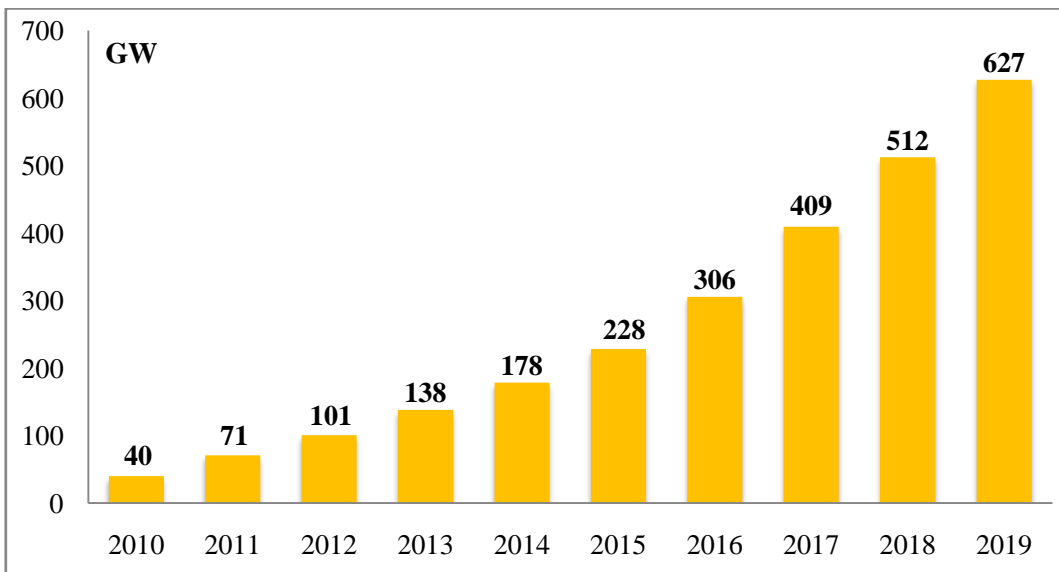
2.3.1 Güneş Hücreleri

Fotovoltaik (PV) güneş elektriği sistemleri de denilen güneş hücreleri, yarı iletken malzemelerden yapılmış olup, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirirler.

2.3.2 Isıl Güneş Teknolojileri ve Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Sistemleri (CSP)

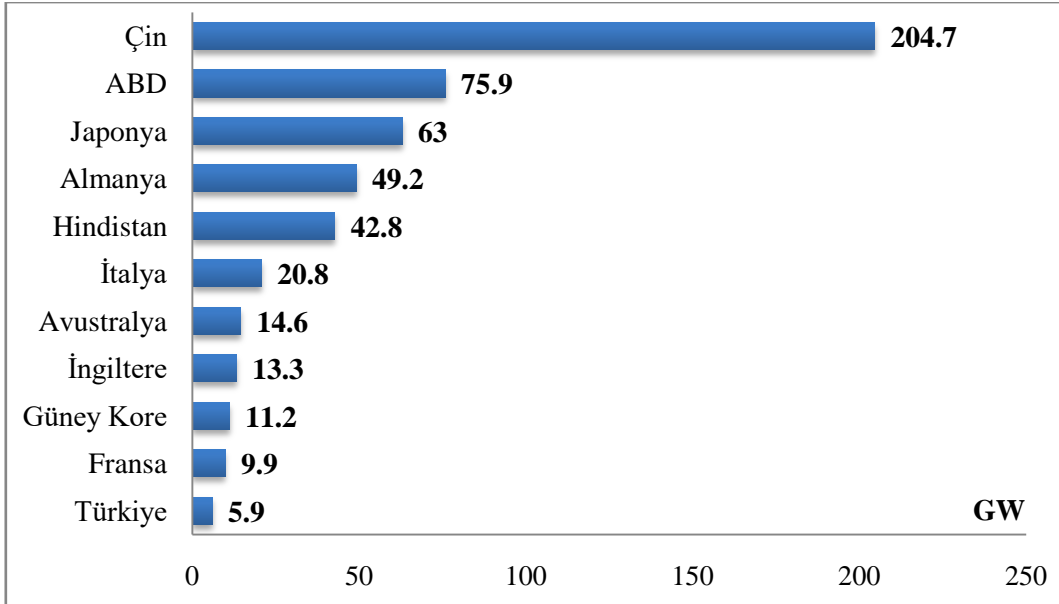
Güneş enerjisinden ısı elde edilen bu sistemlerde, ısı doğrudan kullanılabilceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir.

Dünya genelinde Fotovoltaik (PV) piyasasının büyümesi 1992-2018 yılları arasında büyük gelişim göstermiştir. 1992 yılında dünyada toplam PV kurulu güç kapasitesi yalnızca 46 MW iken, 2019 yılı sonunda toplam PV kurulu güç kapasitesi 627 GW'a ulaşmıştır. Dünya genelinde 2019 yılında toplam PV kurulu güç kapasitesi bir önceki yıla göre 115 GW artış göstermiştir. PV piyasası 100 GW eşiğini üst üste üçüncü kez kırmış ve pazar hacmi %12 oranında büyümüştür (İnt. Kyn. 9). PV kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi Şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15 PV kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 9).

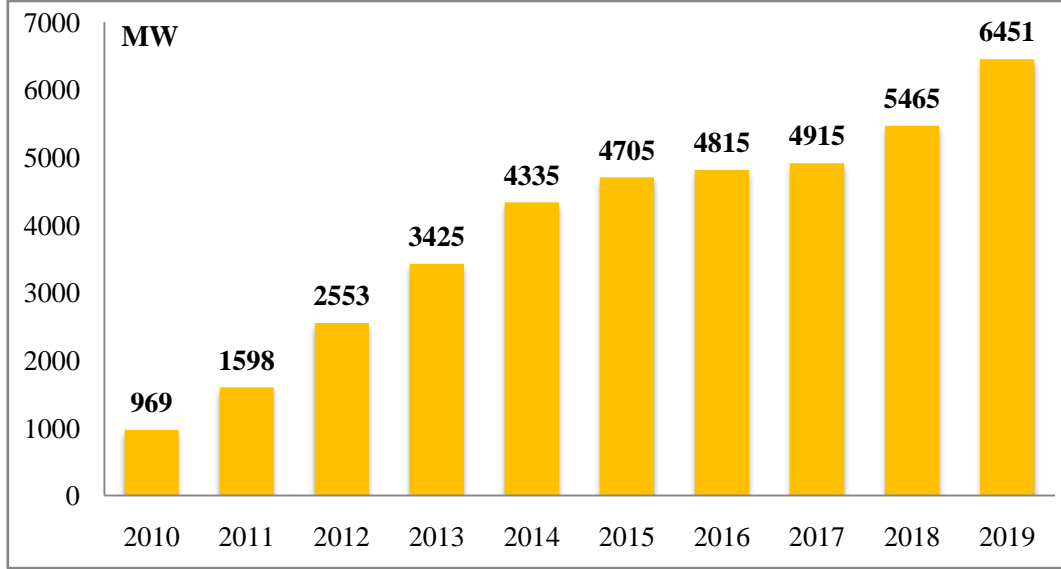
2019 yılı sonuna göre, dünya genelinde Çin 204.7 GW kurulu güç kapasitesi ile birinci sırada yer almaktadır. Çin'i 75.9 GW kurulu güç kapasitesi ile ABD ve 63 GW kurulu güç kapasitesi ile Japonya takip etmektedir. Türkiye, 5.99 GW kurulu güç kapasitesi ile dünya sıralamasında 13. sırada yer almaktadır. Aynı şekilde Çin 30.1 GW yeni kapasite artırımını ile 2019 yılında en büyük kapasite artışı gösteren ülke olmuştur. 2019 yılında, Çin'den sonra en büyük kapasite artışı gösteren ülkeler sırasıyla 13.3 GW ile ABD ve 9.9 GW ile Hindistan olmuştur. Ülkemiz ise 2019 yılında 0.9 GW kapasite artışı göstermiştir. 2019 yılında PV kurulu güç kapasitesindeki ilk 10 ülke ve ülkemizin kurulu güç kapasitesi Şekil 2.16' da verilmiştir.



Şekil 2.16 PV kurulu güç kapasitesindeki ilk 10 ülke ve ülkemizin kapasitesi (İnt. Kyn. 9).

Yoğunlaştırıcı güneş güç sistemleri (CSP) 2005 - 2015 yılları arasında büyük bir ivme kazanmıştır. 2015-2018 yılları arasında global CSP kurulu güç kapasitesindeki büyümede bir yavaşlama olsa da, 2018 yılından itibaren tekrardan kapasite artışı hızlanmıştır. Dünya genelinde CSP sistemlerinde toplam kurulu güç kapasitesi 2005 yılında 354 MW iken, 2013 yılında yaklaşık on kat artarak 3425 MW'a çıkmış ve 2019 yılı sonunda toplam kurulu güç kapasitesi 6451 MW'a ulaşmıştır. CSP sistemlerinde global kurulu güç kapasitesi, 2018 ve 2019 yılında sırasıyla 550 MW ve 986 MW artış göstermiştir. Dünya genelinde CSP toplam kurulu güç kapasitesi, bir önceki yıla göre 2019 yılında % 11 oranında büyümüştür.

CSP sistemleri hızla büyüyen bir teknolojidir ve maliyetleri daha düşük olan PV sistemleri ile giderek daha rekabetçi bir konuma gelmiştir. Güneş radyasyonuna yüksek maruz kalan bölgeler için en iyi seçenek, CSP sistemleridir. Dünya genelinde, global CSP kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi Şekil 2.17’de gösterilmiştir.

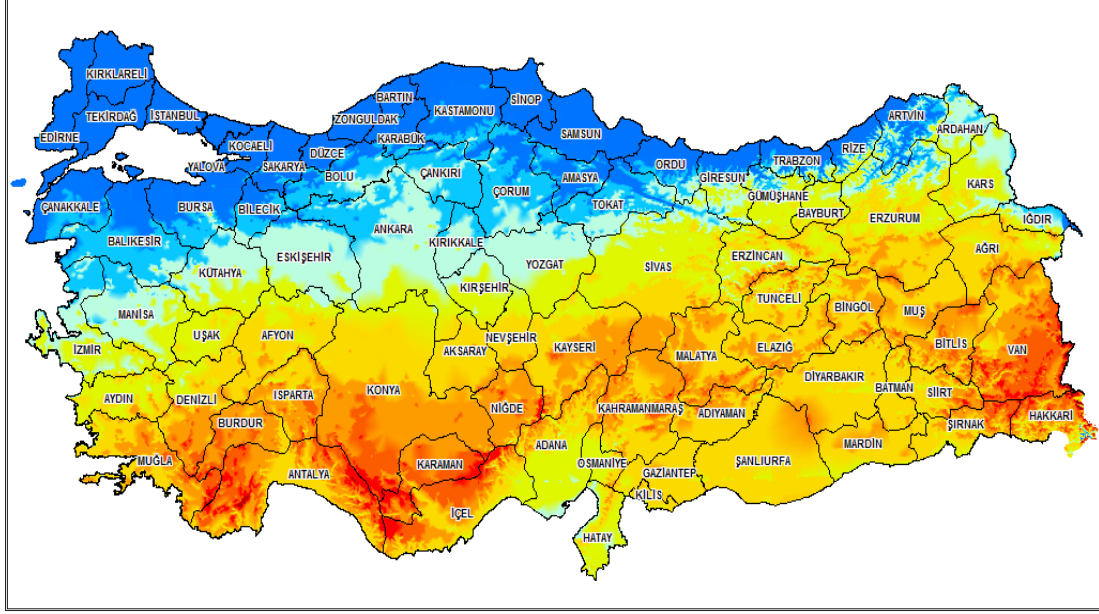


Şekil 2.17 CSP kurulu güç kapasitesinin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 9).

2019 yılı sonuna göre, dünya genelinde CSP kurulu güç kapasitesi en yüksek olan ülke 2300 MW kurulu güç kapasitesi ile İspanya’dır. 2013 yılından beri kapasite artırımına gitmeyen İspanya, hâlihazırda zirvedeki yerini korumaktadır. 1740 MW kurulu güç kapasitesi ile ABD ikinci, 530 MW kurulu güç kapasitesi ile Fas üçüncü sırada yer almaktadır. 2019 yılında en büyük kapasite artışı gösteren ülkeler, 200 MW kapasite artışı ile Çin ve 150 MW kapasite artışı ile Fas olmuştur. Dünya’da en büyük kurulu güç kapasitesine sahip CSP santrali, 510 MW kurulu güç kapasitesi ile Fas’da yer alan Noor Güneş Santralidir. Günümüzde Dubai’de inşası devam eden ve 2020 yılı sonunda devreye alınması hedeflenen CSP santrali, devreye alındığı takdirde 700 MW kurulu güç kapasitesi ile dünyadaki en büyük CSP santrali olacaktır.

Türkiye’nin mevcut coğrafi konumu, güneş enerjisi potansiyeli bakımından çok verimlidir. Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası’na (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresinin 2741 saat (günlük 7.5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisinin

1527 kWh/m² (günlük 4.2 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir (İnt. Kyn. 8). Şekil 2.18’de Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası verilmiştir.

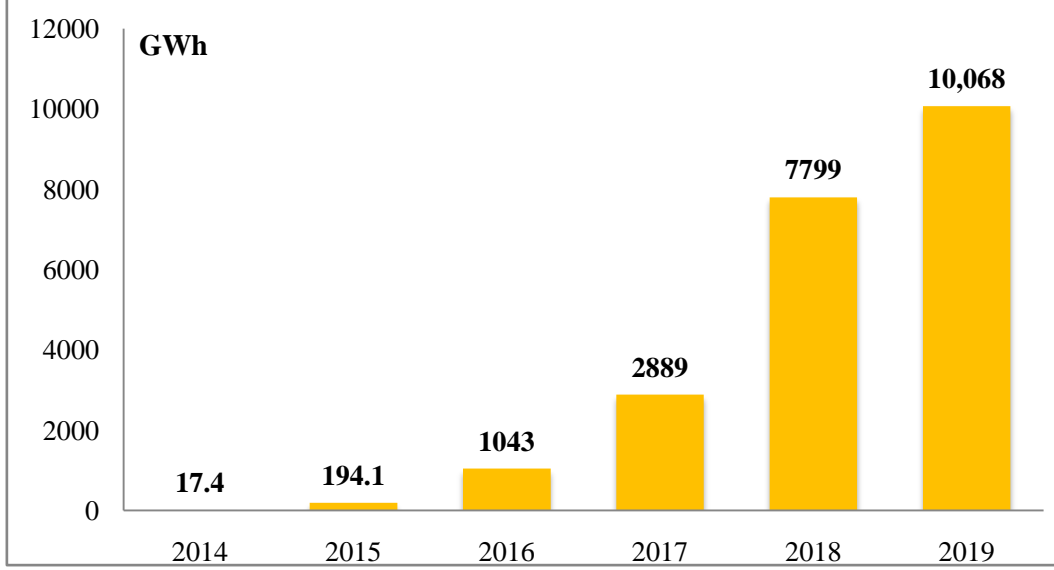


Şekil 2.18 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (İnt. Kyn. 8).

Türkiye'nin toplam kurulu gücü yıldan yıla; nüfusa, artan ihtiyaçlara, ekonomik ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak artmaktadır. Türkiye'nin toplam kurulu gücü 2019 yılı sonu verilerine göre, bir önceki yıla oranla %3.07 artışla 91,267 MW'a ulaşmıştır. Kurulu güç içerisinde GES'lerin payı ise bir önceki yıla göre %18.41 artışla 5995 MW'a ulaşmıştır. Türkiye'de güneş enerjisinde ilk kurulu güç 2014 yılında 40 MW kapasite ile üretime başlamış, şu an gelinen noktada kurulu güç miktarı 2014 yılına göre yaklaşık 150 kat artış göstererek 5995 MW'a ulaşmıştır. Ancak güneşlenme sürelerinin bu kadar fazla olduğu ülkemizde güneş enerjisi santralleri toplam kurulu gücünün, toplam kurulu güç içindeki payı halen %6.6'dır. (İnt. Kyn. 2).

Güneş enerjisinden elektrik üretmeye 2014 yılında 17.4 GWh ile başlayan ülkemizde 2019 yılı üretimi 10,068 GWh olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizde 2018 yılında toplam elektrik üretiminde, güneş enerjisinin payı %2.6 iken, 2019 yılında güneş enerjisinin payı %3.3'e yükselmiştir. Güneş enerjisinden geç faydalanmaya başlayan ülkemizde bu artış geçmiş yıllara oranla çok hızlı olmuş ve güneş hem yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik içindeki payını hem de toplam elektrik üretimi içindeki payını ciddi oranda

artırmıştır. Ülkemizin güneş enerjisinden elektrik üretme potansiyeli çok yüksektir. Doğru planlamalar ve stratejiler ile güneş enerjisi sayesinde, ülkemizin enerji maddeleri ithalatı önemli ölçüde azaltılabilir. Türkiye’de güneş enerjisinden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi Şekil 2.19’da gösterilmiştir (İnt. Kyn. 7).



Şekil 2.19 Türkiye’de güneş enerjisinden üretilen elektriğin yıllara göre değişimi (İnt. Kyn. 7)

2.4 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Yöntemleri

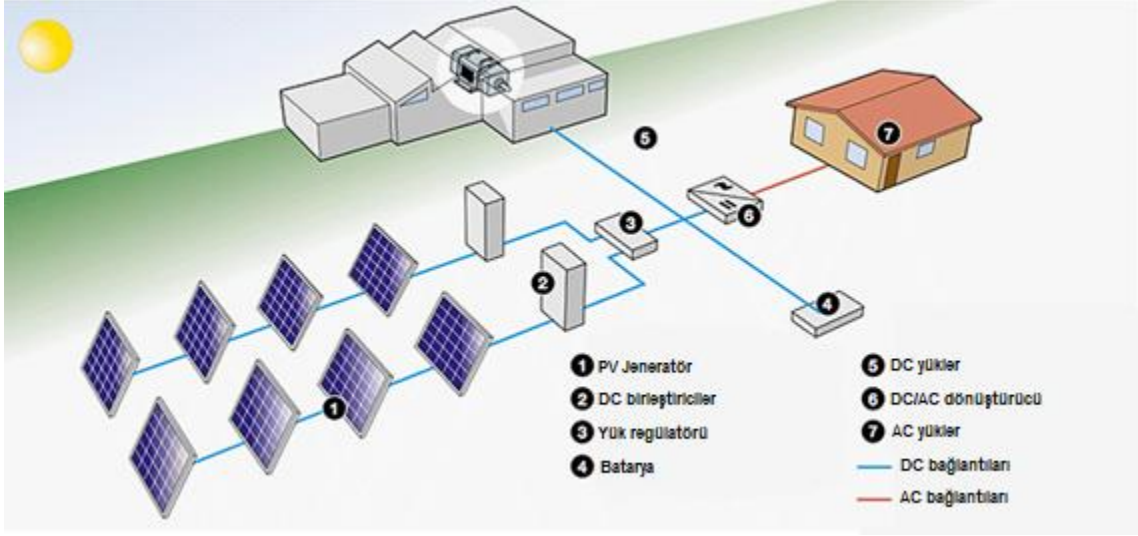
Bugüne kadar güneş enerjisi ile elektrik üretiminde başlıca iki sistem kullanılmıştır. Birincisi, güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemlerdir. Fakat geçen 20 yıl içerisinde fotovoltaik sistem uygulamalarının artışına rağmen, teknolojisinin karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek oluşu, geniş çapta elektrik üretimi için yetersiz olduğunu ortaya çıkarmıştır. İkinci seçenek ise, güneş enerjisinin yoğunlaştırıcı güneş güç (CSP) sistemleri kullanılarak odaklanması sonucunda elde edilen kızgın buhardan, konvansiyonel yöntemlerle elektrik üretimidir (Yigit ve Atmaca 2018). Aşağıda güneş enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan sistemler, fotovoltaik (PV) sistemler ve yoğunlaştırıcı güneş güç (CSP) sistemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenecektir. Tez çalışması kapsamında modellerde kullanılması tercih edilen yoğunlaştırıcı güneş güç (CSP) sistemleri arasında yer alan parabolik oluklu kolektör sistemi detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.4.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler

2.4.1.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler

Güneş hücreleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Fotovoltaik modüller uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik sistemi oluştururlar.

Şebekeden bağımsız sistemlerde yeterli sayıda fotovoltaik modül, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Fotovoltaik modüller gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan denetim birimi ise akünün durumuna göre, ya fotovoltaik modüllerden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz'lik sinüs dalgasına dönüştürülür. Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Bazı sistemlerde, fotovoltaik modüllerin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazda bulunur (İnt. Kyn. 10). Şekil 2.20'de PV sistemler ile elektrik üretiminin şeması verilmiştir.

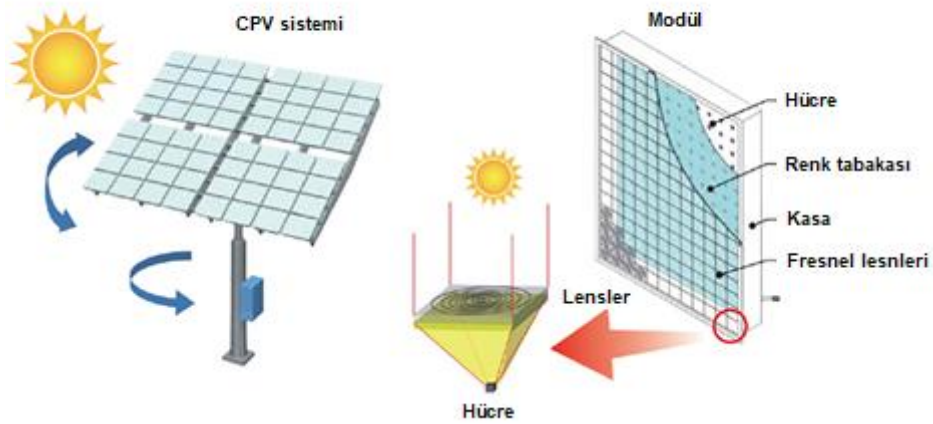


Şekil 2.20 PV sistemler ile elektrik üretiminin şematik resmi (İnt. Kyn. 10).

2.4.1.2 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik (CPV) Sistemler

Silisyum bazlı düzlemsel fotovoltaik malzemeden oluşan hücre yüzeyine çarpan güneş ışığı, elektrik enerjisine dönüştürülür. CPV teknolojisi, daha az malzeme kullanılması dolayısıyla daha düşük fiyat, yüksek verim ve daha etkin pratik bir yol sunmaktadır. Optik yoğunlaştırıcılar (CPV), güneş ışınlarını çok küçük bir alan kaplayan (1 cm^2) hücrenin üzerine odaklar ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. CPV teknolojilerinde pahalı olmayan aynalar ve mercekler gibi optik malzemeler kullanılır (Şekil 2.21).

CPV sisteminde kullanılan çok eklemlili güneş hücreleri, dönüşüm veriminin artmasına yardımcı olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalara göre; çok eklemlili güneş hücrelerinin kullanılmasıyla verimi %40'a ulaşmıştır. Bu çok eklemlili PV sistemler, güneş spektrumunun önemli bir kısmını kullanarak, gelen güneş enerjisini daha verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürmektedirler (İnt. Kyn. 10).



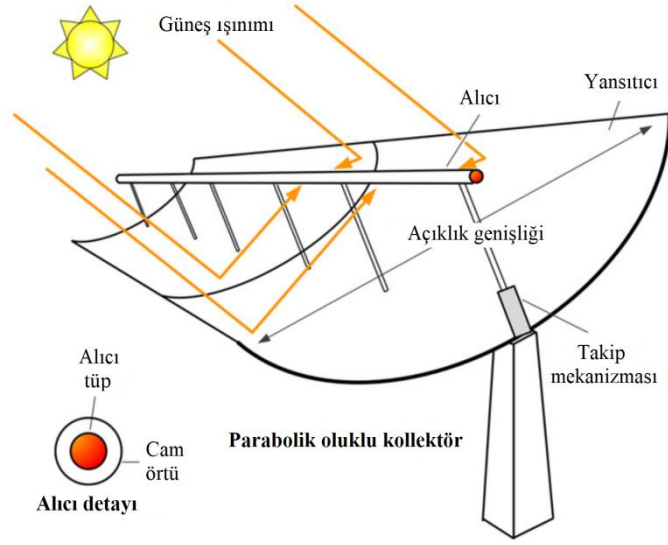
Şekil 2.21 Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistem tasarımı (İnt. Kyn. 11).

2.4.2 Yoğunlaştırıcı Güneş Güç (CSP) Sistemleri

2.4.2.1 Parabolik Oluklu Kollektör (PTC) Sistemleri

Yüksek sıcaklıkları iyi bir verimlilik ile sunmak için yüksek performanslı bir güneş kollektörü gereklidir. Parabolik oluklu kollektörler (PTC) ile 400°C'ye kadar proses ısısı uygulamaları için hafif yapıları ve düşük maliyetli teknolojiye sahip sistemler elde edilebilir. PTC'ler 50°C ile 400°C arasındaki sıcaklıklarda etkili bir şekilde ısı üretebilir.

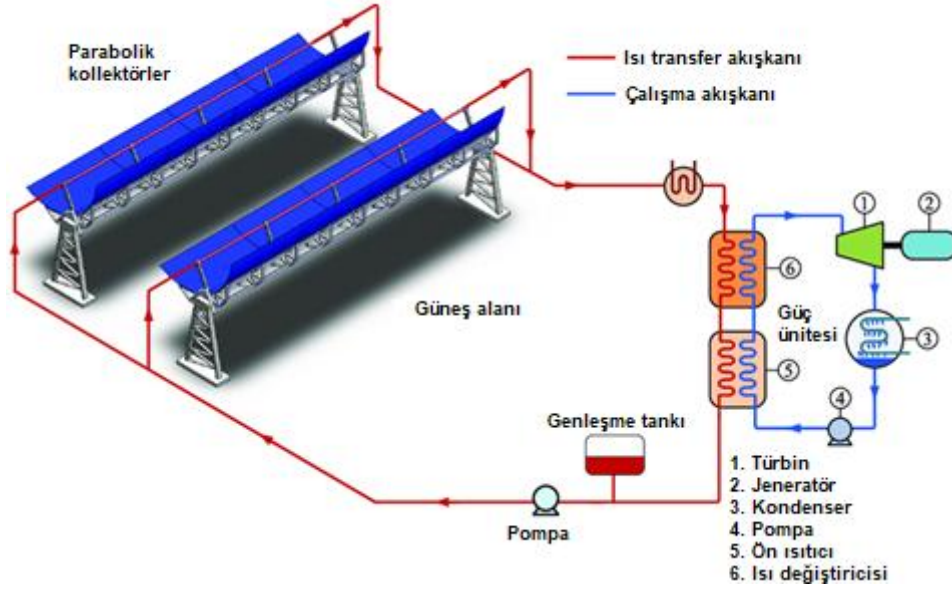
Parabolik oluklu kollektörler bir yansıtıcı malzeme tabakasını parabolik bir şekle bükerek yapılırlar. Parabolik oluklu kollektörlerin alıcısı doğrusaldır ve alıcı tüp odak hattı boyunca yerleştirilir. Alıcı tüpün boyutu ve dolayısıyla konsantrasyon oranı, yansıyan güneş radyasyonunun boyutu ve oluşun üretim toleransları ile belirlenir. Isı kayıplarını azaltmak için cam kapak tüp ile, alıcının yüzeyi odak hattı boyunca kaplanır. Parabolik yansıtıcı aynalar güneşe doğru baktığında, yansıtıcı aynalarda meydana gelen paralel ışınlar alıcı tüpe yansıtılır. Alıcı tüpe ulaşan konsantre radyasyon, alıcı içinde dolaşan ısı transfer akışkanını (sentetik yağ) ısıtır, böylece güneş radyasyonunu faydalı ısıya dönüştürür. Şekil 2.22'de parabolik oluklu kollektör gösterilmiştir (Kalogirou 2009).



Şekil 2.22 Parabolik oluklu kolektör (Cabrera vd. 2013).

PTC'li güneş güç santrallerinde, parabolik kolektörler Rankine çevriminin buhar türbininde buhar üretmek için gerekli olan termal enerjiyi sağlarlar. Toplayıcı alanı, güneşin sürekli olarak doğrusal alıcıya odaklanmasını sağlamak için gün boyunca kuzey-güney yatay ekseninde hizalı paralel sıralara monte edilen ve güneşi doğudan batıya doğru takip eden birçok büyük tek eksenli PTC'lerden oluşur. Alıcı tüplerin içinde bir ısı transfer sıvısı (sentetik yağ) sirküle edilir ve burada güneş enerjisi ile ısıtılır. Genelde kullanılan sentetik yağlar; aromatik hidrokarbon, bifenil-difenil oksit, Monsanto Therminol VP-1 markasıdır. Daha sonra sentetik yağ, geleneksel bir elektrik üreten türbini tahrik eden buharı üretmek için bir ısı eşanjöründen geçirilir. Elde edilen buhar elektrik üretmek için geleneksel bir buhar türbini-jeneratörü içinde kullanılır. Türbinden gelen buhar standart bir yoğunlaştırıcıya gönderilir ve tekrar buhara dönüştürülecek şekilde pompalarla ısı eşanjörlerine geri yollanır. Şekil 2.23'de PTC'li bir güneş güç santralinin tasarımı gösterilmiştir.

Parabolik oluk teknolojisi, sistemlerdeki önemli deneyim ve bu sistemleri üretmek ve pazarlamak için ticari bir endüstrinin gelişmesi nedeniyle güneş termal teknolojilerinin en gelişmişidir. PTC'ler, elektrik üretimi veya proses ısısı uygulamaları için 400°C'ye kadar sıcaklıklarda ısı üreten en olgun güneş teknolojisidir. PTC'ler alanındaki yeni gelişmeler ile birlikte maliyet düşürmeyi ve teknolojiye gelişmeleri hedeflemektedir (Kalogirou 2009).



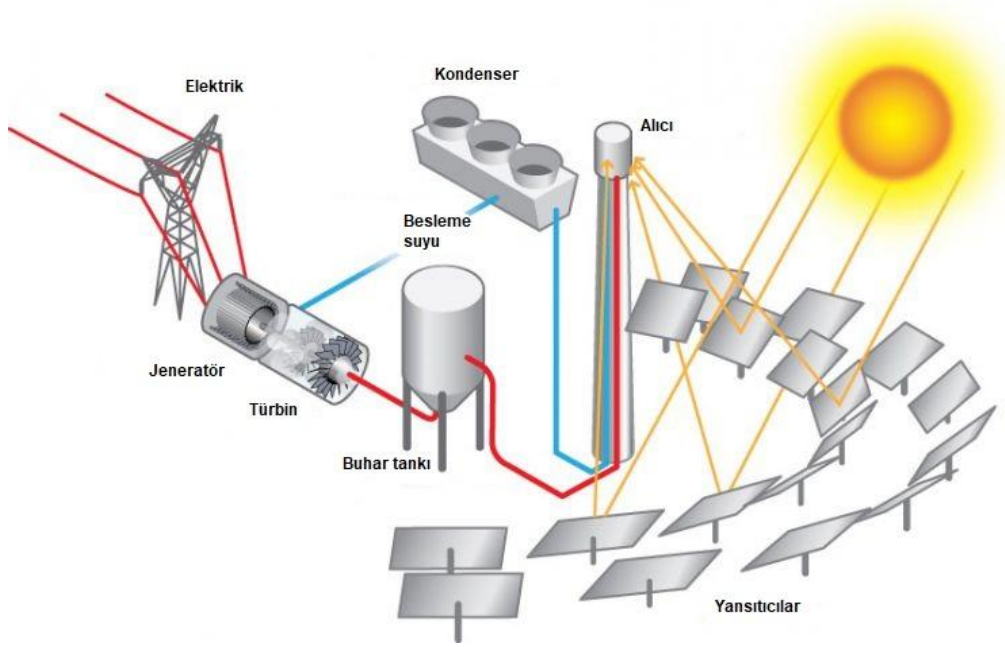
Şekil 2.23 Parabolik oluk kollektörlü güneş güç santralinin tasarımı (Padilla 2011).

2.4.2.2 Merkezi Alıcı (Güç Kulesi) Sistemleri

Güç kuleleri veya merkezi alıcı sistemleri, güneş enerjisini uzun bir kulenin üzerinde bulunan bir alıcıya yansıtmak için heliostat adı verilen binlerce bireysel güneş izleme aynası kullanır. Alıcı, güneşin ısını alıcıdan akan bir ısı transfer sıvısında (erimiş tuz) toplar. Bu daha sonra isteğe bağlı olarak depolamaya ve son olarak termal enerjiyi elektrige dönüştüren ve şebekeyi besleyen bir güç dönüştürme sistemine geçirilir. Tuzun ısı enerjisi, kulenin dibinde bulunan geleneksel bir buhar türbininde buhar üretmek için kullanılır. Erimiş tuz depolama sistemi ısıyı verimli bir şekilde korur, böylece elektrik üretmek için kullanılmadan önce saatlerce, hatta günlerce saklanabilir. Tesiste güç gerektiğinde, sıcak tuz buhar üreten bir jeneratöre pompalanır. Buhar, elektrik üreten bir türbin-jeneratör sistemini harekete geçirir. Buhar üreticisinden tuz, depolandığı ve sonunda alıcıda yeniden ısıtılabilirdiği soğuk depolama tankına geri gönderilir.

Merkezi bir alıcı sistem; heliostatlar, alıcı, ısı aktarımı ve değişimi, termal depolama ve kontrol ünitesi olmak üzere beş ana bileşenden oluşur (Şekil 2.24). Birçok güneş enerjisi çalışmasında, toplayıcının sistemdeki en büyük maliyeti temsil ettiği için, toplanan enerjinin maksimum faydalı dönüşümünü elde etmek için verimli bir motor kullanılmalıdır. Güç kulesi tesislerinin kapasiteleri oldukça büyüktür ve genellikle 10

MW veya daha fazladır. Merkezi alıcı sistemlerin optimum kapasite aralığı 50-400 MW arasındadır (Kalogirou 2009).

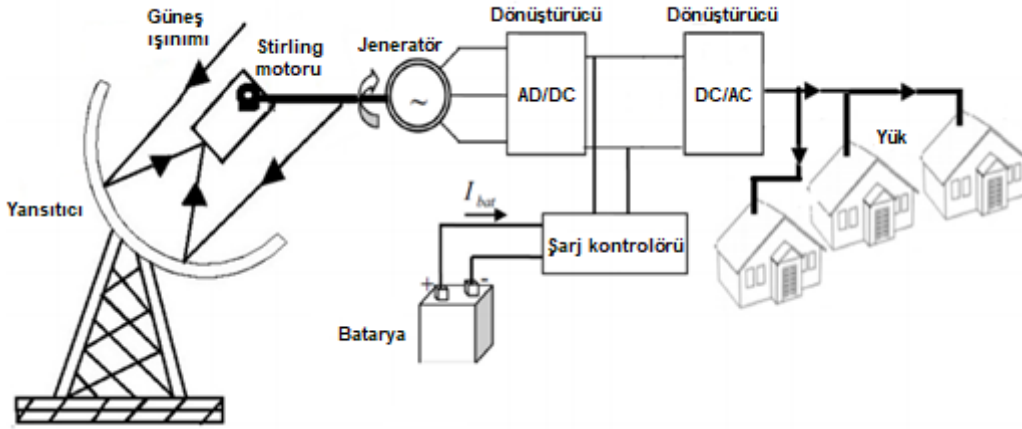


Şekil 2.24 Enerji kulesi güç sisteminin tasarımı (Karatairi 2018).

2.4.2.3 Parabolik Çanak Sistemler

Parabolik çanak sistemleri, güneş ışınlarını çanak odak noktasında çanak üzerine monte edilmiş bir alıcıya yoğunlaştırmak ve odaklamak için yansıtıcı olarak çanak şeklindeki parabolik aynaları kullanır. Alıcı enerjiyi emer ve termal enerjiye dönüştürür. Bu enerji doğrudan ısı olarak kullanılabilir veya kimyasal prosesleri destekleyebilir, ancak en yaygın uygulaması güç üretimidir. Termal enerji merkezi bir jeneratöre taşınabilir veya alıcıya bağlı bir jeneratörde doğrudan elektriğe dönüştürülebilir. Şekil 2.25’de parabolik çanak-stirling motor sistemi gösterilmiştir.

Parabolik çanak sistemi; bir toplayıcı, bir alıcı ve bir motordan oluşan bağımsız bir ünedir. Güneş enerjisini çanak biçimli bir yüzeyle toplayıp enerjiyi emen ve enerjiyi odaktaki Stirling motoru üzerine yoğunlaştırarak çalışır. Stirling motoru ısı enerjisini elektrik jeneratörü için gerekli olan mekanik enerjiye dönüştürür. Ardından bir elektrik jeneratörü mekanik gücü elektrik enerjisine dönüştürür.



Şekil 2.25 Parabolik çanak-stirling motor sistemi (Bataineh ve Taamneh 2017).

Parabolik çanak sistemleri, güneşi takip etmek için çift eksenli bir izleme sistemi kullanır. Konsantrasyon oranları genellikle 600 ile 2000 arasındadır ve 1500°C'nin üzerindeki sıcaklıklara ulaşabilirler. Bu sistemler en verimli güneş kollektör sistemleri olmasına karşın, günümüzde henüz ekonomik olmayan sistemlerdir. Bu yüzden parabolik çanak sistemlerin araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

2.5 Hidrojen Enerjisi

Evrendeki en basit ve en çok bulunan element hidrojendir. Hidrojen, standart sıcaklık ve basınç altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı bir biatomik gazdır. Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği sudur. Bu nedenle hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için doğadaki bileşiklerden ayrıştırılması gerekir. Üretilmesi ise petrol gibi fosil yakıtlar kadar kolay ve karlı değildir. Ancak hidrojenin diğer enerjilerden önemli bir farkı güneş rüzgâr ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi ve kullanıldığında tekrar suya dönüştürülebilmesidir. Hidrojen enerjisi yenilenebilir bir enerji türüdür. Bu özelliği hidrojenin yer altı zenginliklerinden farklı olarak herkesin üretim ve kullanımına açık bir enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır.

Hidrojen 1.00794 g/mol'lük atomik kütlesi ile tüm elementler arasında en hafif elementtir. Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise

1/9'u kadardır. Atmosfer basıncında -253°C ' ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadar olmaktadır. Hidrojenin alt ısı değeri 120,700 kJ/kg iken üst ısı değeri 140,900 kJ/kg' dir. Hidrojen gazının ısı değeri, metreküp basına yaklaşık 12 MJ olarak verilmiştir (Frank vd. 2007).

Isı ve patlama enerjisi gerektiren alanlarda kullanımını temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan sadece su veya su buharı olmaktadır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir. Hidrojen gazı geleneksel yöntemlerle elde edildiği gibi jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgâr, dalga ve biyokütle ile de üretilmektedir.

Günümüzde hidrojen sayesinde enerjiyi farklı şekillerde üretebilecek, depolayabilecek, taşıyabilecek ve kullanabilecek teknolojiler bulunmaktadır. Yenilenebilir ve nükleer enerji kaynakları ile doğal gaz, kömür ve petrol gibi yakıtlarla hidrojen üretilmektedir. Hidrojen, boru hatlarıyla ve gemilerle sıvı hâlde taşınabilir. Elektrikine ve metana dönüştürülerek evler veya yem sektörü için enerji üretebilir veya arabalarda, kamyonlarda, gemilerde ve uçaklarda yakıt olarak kullanılabilir.

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin depolanması için en iyi seçeneklerden biri olan hidrojen, elektriği günler, haftalar, hatta aylar boyunca en düşük maliyetle depolayabilir. Ayrıca hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjiyi güneş ve rüzgâr kaynakları bol olan Avustralya ve Latin Amerika gibi bölgelerden enerji ihtiyacı olan binlerce kilometre uzaktaki şehirlere taşıyabilir. IEA raporunun bulgularına göre yenilenebilir elektrikten hidrojen üretmenin maliyeti, yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşmesi ve hidrojen üretiminin artmasıyla 2030'a kadar yüzde 30 civarında azalacaktır. Yakıt hücrelerinin, yakıt ikmal ekipmanlarının ve elektrik veya sudan elektrik üreten elektrolizörlerin tamamı seri üretimden fayda sağlayabilir.

Araştırmalar, mevcut koşullarda hidrojenin diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat pahalı olduğunu ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanımının hidrojen üretiminde maliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlı olacağını göstermektedir. Hidrojen birincil bir enerji kaynağı değildir, fakat çok iyi bir enerji taşıyıcısıdır. Bu nedenle, günlük veya mevsimlik periyotlarda oluşan ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için de geçerli bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu tarzda depolanan enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi, toplu taşıma amaçları için yakıt piline dayalı otomotiv teknolojilerinin geliştirilmesi, gibi teknolojilere bağlıdır. Dünyanın giderek artan enerji ihtiyacını çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemleri olduğu bugün bütün bilim adamlarınca kabul edilmektedir.

2.5.1 Hidrojen Üretimi

Enerji taşıyıcısı olarak düşünölen hidrojenin üretiminde, fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji kullanılabilir. Hidrojenin üretilmesi, taşınması, depolanması ve kullanılmasında günümüzde çeşitli teknolojiler mevcut olup, yeni pek çok değişik teknolojiye geliştirilmektedir. Gerek konvensiyonel olarak kullanılan hidroelektrik, nükleer, doğal gaz vb. gibi enerji kaynaklarının, gerekse biyokütle, rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil olarak kullanılmasıyla sudan hidrojen üretimi günümüzde kolaylıkla uygulanabilen hidrojen üretim teknolojileri arasındadır.

Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik ham maddelerden üretilebilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilir. Kullanılan hammaddeler ise su, fosil yakıtlar ve biyokütledir. Hidrojenin temelde, sudan yenilenebilir enerjilerle üretilmesi ana ilkedir. Hidrojen üretim yöntemlerinin başında, suyun elektrik kullanılarak elektroliz ile parçalanması gelir. Elektroliz için elektrik ihtiyacı fosil yakıtlardan, hidroelektrikten, nükleer güçten, jeotermal enerjiden, güneş, rüzgâr ve deniz dalgası gibi kaynaklardan karşılanabilir.

Hidrojen suyun ısı işlem ile parçalanmasıyla da üretilebilmektedir. Bir diğer hidrojen üretim yöntemi doğal gazın ve gaz hidrokarbonların buhar reformasyonudur. Hidrojen üretimi için ayrıca kömür gazifikasyon yöntemi vardır. Gazifikasyon işlemi kolaylıkla kükürdün elimine edilmesine olanak tanıdığından çekici bulunmaktadır. Ortalama olarak 6 kg kömürden 1 kg hidrojen elde edilir. Kömür, dünyada en fazla bulunan fosil yakıttır. Bilinen kömür yataklarına biçilen güvenilir ömür 200 yıl kadarsa da, bunun 400 yıla uzanabileceği söylenmektedir. Katı atıklar ve kanalizasyon materyalleri de hidrojen üretimi için hammadde olup, gazifikasyon işlemine bağlı olarak, sentez gazının hava veya oksijenle reformasyonu hidrojen vermektedir. Termokimyasal çevrimlerle sudan, fotokimyasal işlemle organometalik bileşikler veya enzim su karışımından hidrojen üretilebilir..

Temel hidrojen üretim yöntemleri genel olarak şöyle sınıflandırılabilir; ısı, kimyasal ve biyolojik işlemler. Bu genel başlıkları açıklamak için aşağıda Çizelge 2.2’de gerekli açıklamalar ve bağlantılı yöntemler verilmiştir. Ayrıca bu tabloda gösterildiği gibi hidrojenin konvensiyonel ve yenilenebilir olarak kullanılan birincil kaynakları ile üretiminde nasıl bir proses izlendiği de açık bir şekilde ifade edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji kullanılarak üretilen hidrojen elektroliz ünitesinde jeotermal enerjiden elde edilen elektrik ve/veya ısının elektroliz işleminde kullanılmasıyla hidrojen üretilmektedir (İnt. Kyn. 12).

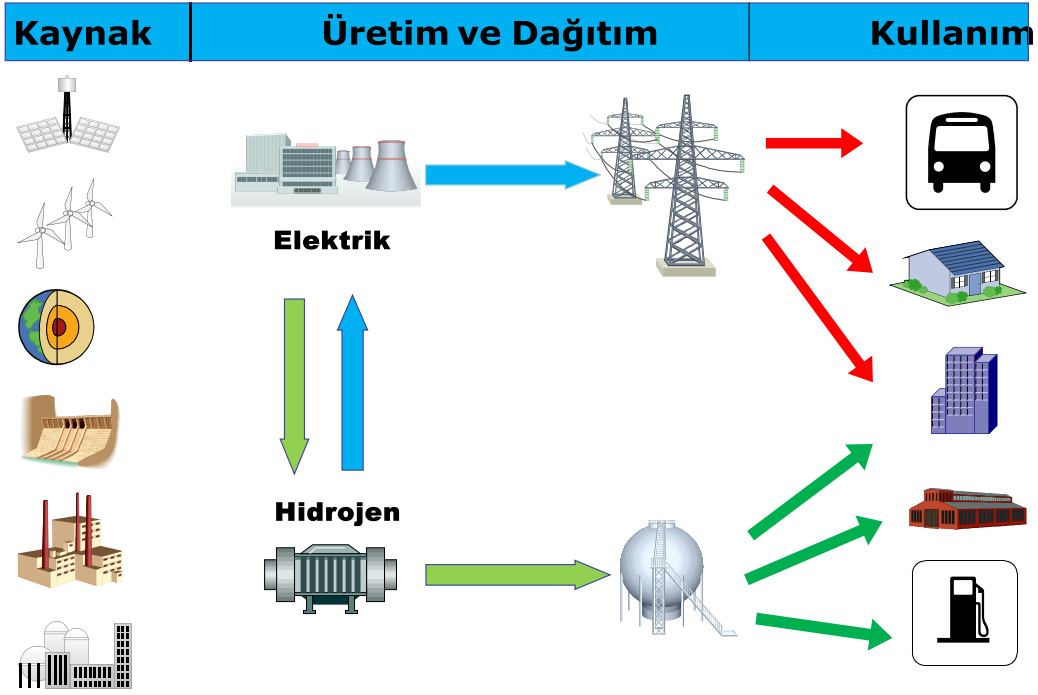
Çizelge 2.2 Hidrojen üretim yöntemlerinin metot ve kaynak çeşitlerin göre sınıflandırılması (İnt. Kyn. 12).

Yöntem	Proses	Kaynak	Enerji	Emisyon
Isıl işlem	Buharlı dönüşüm	Doğalgaz	Yüksek sıcaklıkta buhar	CO ₂ , CO
	Termokimyasal su ayrışımı	Su	Nükleer reaktörlerden elde edilen yüksek sıcaklık	Yok
	Gazifikasyon	Kömür, biyokütle	Yüksek sıcaklık ve basınçta su buharı ve oksijen	CO ₂ , CO
	Piroliz	Biyokütle	Orta sıcaklıkta su buharı	CO ₂ , CO

Çizelge 2.2 (Devam)

Elektrokimyasal	Elektroliz	Su	Elektrik (Rüzgâr, güneş, jeotermal)	Yok
	Elektroliz	Su	Elektrik (kömür, doğalgaz)	Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar
	Fotoelektrokimyasal	Su	Güneş ışığı	Yok
Biyolojik	Fotobiyolojik	Su ve alg bakterisi	Güneş ışığı	Yok
	Oksijensiz sindirim	Biyokütle	Yüksek ısı	Az
	Fermantatik mikroorganizmalar	Biyokütle	Yüksek ısı	Az

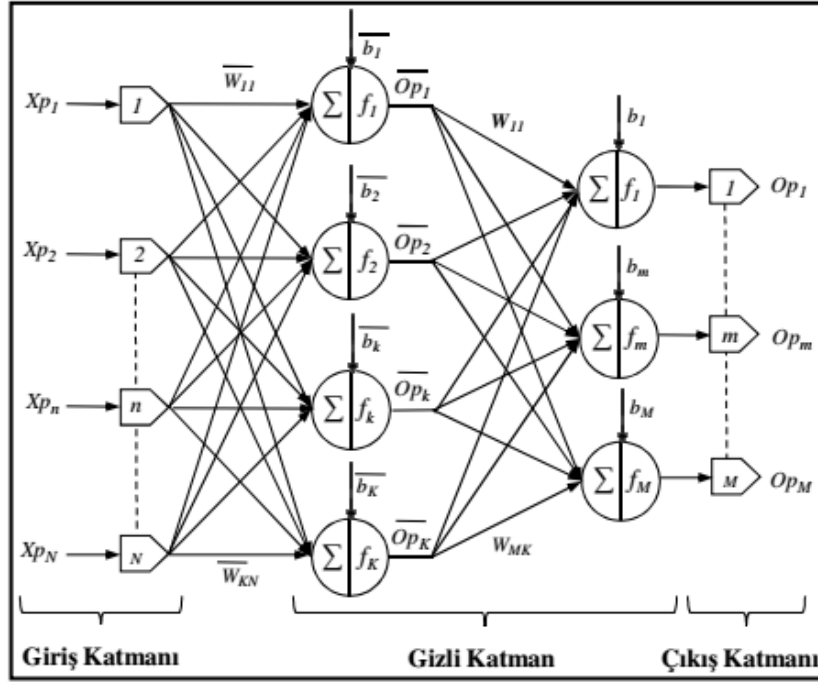
Hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu enerji, sudan elde edilebilmekte ve yüksek verimlilikle, çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir enerjiye dönüştürülebilmektedir. Elektriksel kaynaklı olmayan enerji kaynakları için talep artmaya devam ettikçe, fosil kaynaklardan fosil olmayan sentetik kaynaklara bir geçiş yapılması zorunlu olacaktır. Yeni enerji kaynaklarının ideal enerji olma yolundaki eksikliklerini tamamlayacak ve bu kaynaklar ile tüketici arasında köprü görevi görecek sistemler oluşturmak ve bu sistemlerde hidrojen enerjisini kullanmak imkân dâhilindedir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26 Hidrojen üretiminde kullanılan kaynaklar ve hidrojen enerji sistemi.

2.6 Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA) insan beyninin öğrenme ve karar verme gibi becerilerinin matematiksel olarak modellenmesi olarak tanımlanabilir. YSA, insan beyninin bilgi işleme şeklinden esinlenerek geliştirilmiş bir tekniktir. YSA ile basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli matematiksel olarak modellenmektedir. YSA insanların düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemleri, matematiksel ortamda yapay olarak çözebilmektedir. Öğrenme, oluşturulan matematiksel yapay sinir ağını örnekler kullanarak eğitime yoluyla gerçekleştirilmektedir. Eğitim süreci tamamlanmış bir YSA, veri sınıflandırması, tanıma, optimizasyon, veri ilişkilendirme ve sistemin ileri çalışma süreçlerine yönelik tahminler gibi saf aritmetik yöntemlerle yapılması güç işlemleri matematiksel olarak yapabilmektedir. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla oluşan yapılardır. YSA, giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Giriş katmanı ağa veri girişini, çıkış katmanı ise ağdan veri çıkışını sağlamaktadır. Şekil 2.27'de çok katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı verilmiştir (Koyuncu vd. 2019).



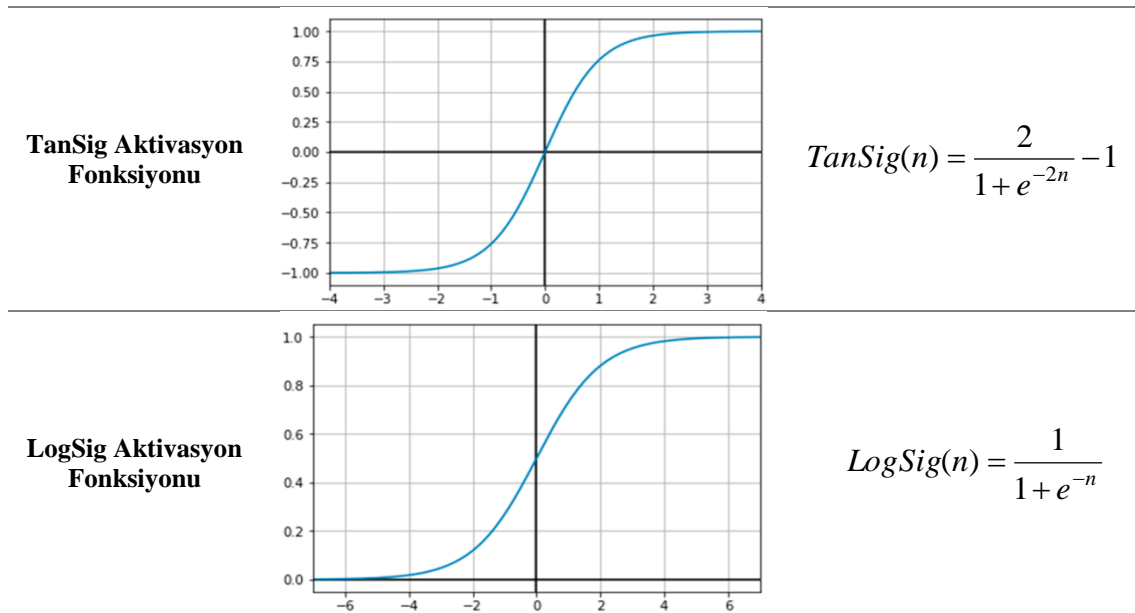
Şekil 2.27 Çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA genel yapısı (Koyuncu vd. 2019).

Giriş katmanı, yapay sinir ağına dış dünyadan girdilerin geldiği katmandır. Bu katmanda dış dünyadan gelecek giriş sayısı kadar hücrenin bulunmasına rağmen genelde girdiler herhangi bir işleme uğramadan alt katmanlara iletilmektedir. Giriş katmanından çıkan bilgiler gizli katmana gelir. Ara katman sayısı ağdan ağa değişebilir. Bazı yapay sinir ağlarında gizli katman bulunmadığı gibi bazı yapay sinir ağlarında ise birden fazla gizli katman bulunmaktadır. Gizli katmanlardaki nöron sayıları giriş ve çıkış sayısından bağımsızdır. Birden fazla gizli katman olan ağlarda gizli katmanların kendi aralarındaki hücre sayıları da farklı olabilir. Gizli katmanların ve bu katmanlardaki nöronların sayısının artması hesaplama karmaşıklığını ve süresini arttırmasına rağmen yapay sinir ağının daha karmaşık problemlerin çözümünde de kullanılabilmesini sağlar (Öztürk ve Şahin 2018).

Çıkış katmanı, gizli katmanlardan gelen bilgileri işleyerek ağın çıktılarını üreten katmandır. Bu katmanda üretilen çıktılar dış dünyaya gönderilir. Geri beslemeli ağlarda bu katmanda üretilen çıktı kullanılarak ağın yeni ağırlık değerleri hesaplanır. Aktivasyon Fonksiyonu, hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye karşılık üreteceği çıktıyı belirler. Aktivasyon fonksiyonu olarak genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyon seçilir. Yapay sinir ağlarının bir özelliği olan “doğrusal olmama” aktivasyon

fonksiyonlarının doğrusal olmama özelliğinden gelmektedir. Aktivasyon fonksiyonu seçilirken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise fonksiyonun türevinin kolay hesaplanabilir olmasıdır. Geri beslemeli ağlarda aktivasyon fonksiyonunun türevi de kullanıldığı için hesaplamamanın yavaşlamaması için türevi kolay hesaplanır bir fonksiyon seçilir. (İnt. Kyn. 13) Günümüzde en yaygın olarak TanSig ve LogSig aktivasyon fonksiyonları kullanılır. Aşağıda bu aktivasyon fonksiyonlarının denklemleri ve değişim eğrileri Çizelge 2.3’ de verilmiştir.

Çizelge 2.3 TanSig ve LogSig aktivasyon fonksiyonlarının denklem ve değişim eğrileri (Zhou ve Cao 2018).



Üretilen modellerin başarımlarını ölçebilmek için standart olarak kabul edilmiş belli metriklerin uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, ortalama mutlak hata, ortalama kare hata, kök ortalama kare hata ve ortalama mutlak yüzde hata gibi değerlendirme ölçütleri araştırılmakta ve karşılaştırılmaktadır. Tahmin metotlarının başarısını ölçmede kullanılan dört temel metot açıklamaları ve denklemleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

2.6.1 Ortalama Mutlak Hata (MAE)

Ortalama mutlak hata (MAE) iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsüdür. MAE, her gerçek değer ile veriye en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama dikey mesafedir. MAE

aynı zamanda her veri noktası ile en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama yatay mesafedir. MAE değeri kolay yorumlanabilir olduğu için regresyon ve zaman serisi problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. MAE, yönlerini dikkate almadan bir dizi tahmindeki hataların ortalama büyüklüğünü ölçen, tüm tekil hataların ortalamada eşit olarak ağırlıklandırıldığı doğrusal bir skordur. MAE değeri 0'dan ∞ 'a kadar değişebilir. Negatif yönelimli puanlar yani daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir.

2.6.2 Ortalama Kare Hata (MSE)

Basitçe, ortalama kare hata bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya ne kadar yakın olduğunu ifade etmektedir. MSE, bir makine öğrenmesi modelinin, tahminleyicinin performansını ölçer, her zaman pozitif değerlidir ve MSE değeri sıfıra yakın olan tahminleyicilerin daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.

2.6.3 Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)

Bir makine öğrenmesi modelinin, tahminleyicinin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerleri arasındaki uzaklığın bulunmasında sıklıkla kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçen kuadratik bir metriktir. RMSE tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapmasıdır. Yani kalıntılar, regresyon hattının veri noktalarından ne kadar uzakta olduğunun bir ölçüsüdür; RMSE ise bu kalıntıların ne kadar yayıldığına bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, verilere en iyi uyan çizgi etrafında o verilerin ne kadar yoğun olduğunu söyler. RMSE değeri 0'dan ∞ 'a kadar değişebilir. Negatif yönelimli puanlar yani daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir. RMSE değerinin sıfır olması modelin hiç hata yapmadığı anlamına gelir. RMSE, büyük hataları daha fazla cezalandırmanın avantajına sahiptir, bu yüzden bazı durumlara daha uygun olabilir. RMSE, birçok matematiksel hesaplamada istenmeyen mutlak değer kullanıldığını engeller.

2.6.4 Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)

Regresyon ve zaman serileri modellerinde tahminlerin doğruluğunu ölçmek için ortalama mutlak yüzde hata sıkça kullanılmaktadır. Gerçek değerler arasında sıfır içerenler varsa, sıfır ile bölünme olacağı için MAPE hesaplanamaz. Çok düşük tahmin değerleri için yüzde hatası %100'ü geçemez, ancak çok yüksek tahmin değerleri olduğunda yüzde hatasının üst sınırı yoktur. MAPE, tahminleyicilerin doğruluğunu karşılaştırmak için kullanıldığında, tahminleri çok düşük olan bir yöntemi sistematik olarak seçmesi nedeniyle önyargılıdır. Bu ufak ama ciddi problemin, tahmin değerlerin gerçek değerlerine oranını bulan bir doğruluk ölçütü ile üstesinden gelinebilir. Bu yaklaşım geometrik ortalama açısından yorumlanabilen tahminlere yol açar (İnt. Kyn. 14). Çizelge 2.4'de yer alan denklemlerde n veri setinin boyutu, y_i EES programının çıktı değerleri ve \hat{y}_i YSA tabanlı MATLAB programının çıktı değerleridir.

Çizelge 2.4 Model başarımlar ölçütleri (Koyuncu vd. 2020).

Model	Denklem
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $
Ortalama Kare Hata (MSE)	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$
Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)	$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $

2.7 Genetik Algoritma

Optimizasyon, verilen amaç veya amaçlar doğrultusunda belirli kısıtlamaların sağlanarak en uygun çözümün elde edilme sürecidir. Matematiksel olarak ifade edilecek olursak optimizasyon, bir gerçel fonksiyonu minimize ya da maksimize etmek amacı ile gerçek ya da tam sayı değerlerini tanımlı bir aralıkta seçip fonksiyona yerleştirerek

sistematik olarak bir problemi incelemek ya da çözmek işlemlerini ifade eder. Optimizasyon, karar verme süreçlerini hızlandırmakta ve karar kalitesini arttırmakta kullanılarak gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin etkin, doğru ve gerçek zamanlı çözümünde yararlanılmaktadır. Optimizasyon, ekonomik olarak getirdiği kazançların yanında, sistemde yer alan kaynakların kalitesinin yükseltilmesinde de etkin bir şekilde başvurulan bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Optimizasyonun amacı, tanımından da anlaşıldığı üzere, en iyi sonuca, en iyi hedefe ulaşmaktır. En iyi sonuca ulaşmak için de mevcut durum ya da durumlar üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmelidir.

Termal sistemlerinin tasarımında hangi proses yada ekipmanın seçileceği, bunların nasıl yerleştirileceği, sistemin boyutları, sistem içindeki akışkanların hangi optimum sıcaklık, basınç, debi ve kimyasal kompozisyonlarda çalışacağı gibi parametreler oldukça önemlidir. Bu sorulara cevap verebilmek için sisteminize en uygun optimizasyon metodunu sistem tasarımı aşamasında seçmek gerekmektedir. Bir optimizasyon probleminin tanımlanmasında ilk adım optimize edilecek sistemin sınırlarının açık bir biçimde belirtilmesidir. Sistemin çalışma performansını etkileyecek bütün alt sistemler optimizasyon problemi içinde ifade edilmelidir. Sistemin temel olarak inceleneceği ve optimize edileceği kriterler optimizasyon probleminin anahtar unsurlarıdır.

İyileştirilmiş veya optimize edilmiş bir tasarım, sistemin yapısına uygun olarak tanımlanan optimizasyon kriterinin minimize veya maksimize edilmesi sonucu oluşturulmuştur (Bejan vd. 1996). Bir optimizasyon problemini tanımlarken bir diğer önemli unsur, mevcut tasarım seçeneklerini ifade edecek “tasarım değişkenleri” nin belirlenmesidir. Bu değişkenler belirlenirken genel olarak sistem verimini ve maliyet verimliliğini etkileyen tüm önemli değişkenlerin gözden geçirilmesi ve seçilmesi gerekmektedir. Sistemi oluşturan alt birimler ve bir bütün olarak sistemin kendisi belli sayısal kümelerle tanımlanır. Bu özelliklerin bir kısmı dış koşullarla belirlenmiştir: çevresel basınç ve sıcaklık, yakıt fiyatları, v.b. Geriye kalanlar ise değişken özellikler taşımaktadır. Bir başka deyişle değerleri optimizasyon işlemi sırasında değişim gösterir. Değerleri bir başka değişkene ya da parametreye bağlı olmayan değişkenlere “bağımsız” veya “tasarım” değişkenleri denir. “Bağımlı” değişken olarak adlandırılan parametreler ise sistem kısıtlamalarını ifade eden eşitliklerin çözümü sonucu elde

edilirler. Bir optimizasyon probleminin matematiksel modeli aşağıdaki unsurları içermelidir:

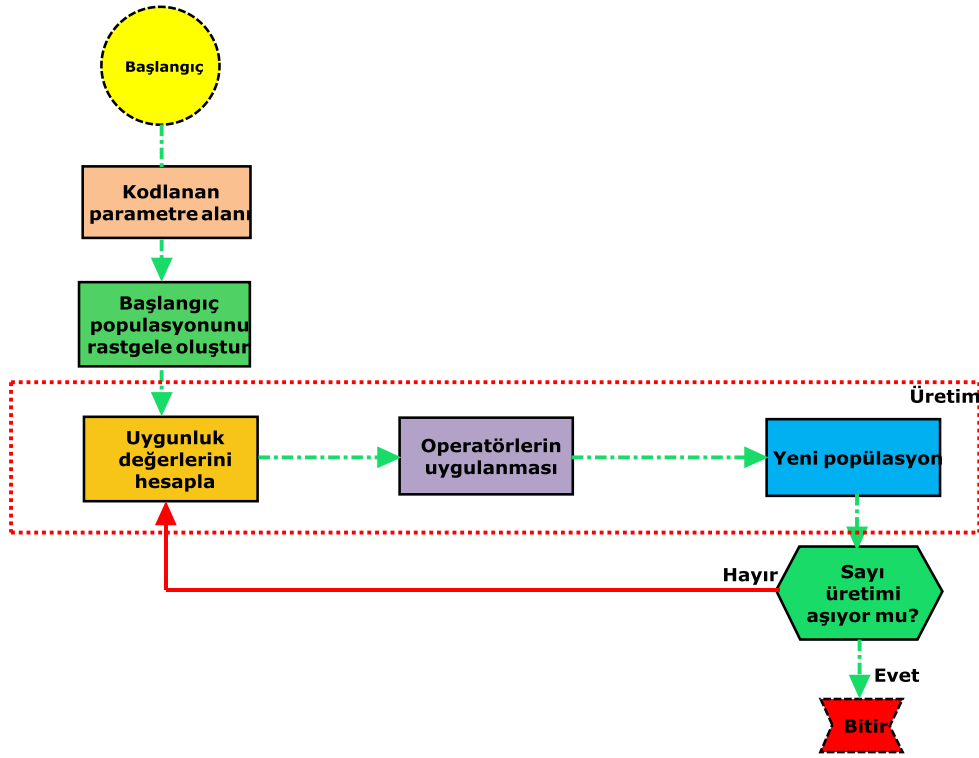
- Minimize veya maksimize edilecek bir amaç fonksiyonu.
- Sistem sınırlarını ifade eden eşitlikler kümesi.
- Sistem sınırlarını ifade eden eşitsizlikler kümesi.

Genetik algoritma, doğada gözlemlenen evrimsel sürece benzer bir şekilde çalışan arama ve optimizasyon yöntemidir. Karmaşık çok boyutlu arama uzayında en iyinin hayatta kalması ilkesine göre bütünsel en iyi çözümü arar. Genetik algoritmalar problemlere tek bir çözüm üretmek yerine farklı çözümlerden oluşan bir çözüm kümesi üretir. Böylelikle, arama uzayında aynı anda birçok nokta değerlendirilmekte ve sonuçta bütünsel çözüme ulaşma olasılığı yükselmektedir. Çözüm kümesindeki çözümler birbirinden tamamen bağımsızdır. Her biri çok boyutlu uzay üzerinde bir vektördür.

Genetik algoritmada kullanılan kavramlar, biyolojideki evrim teorisine benzer anlamda kullanılmaktadır. Doğal yaşamda popülasyonlar bireylerin bir arada bulunmasıyla oluşmaktadır. Genetik algoritması için oluşturulan popülasyon da çok sayıda bireyin bir araya gelmesiyle, başka bir deyişle çok sayıda olası çözüm adaylarının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Aday çözümler, probleme uygun şekilde kodlanmış diziler halinde tutulurlar. Bu diziyi oluşturan her bir elemana birey denir ve her bir birey arama uzayında belirli bir bölgeyi temsil eder.

Genetik algoritmada ilk başlangıç bireyleri genellikle rastgele olarak üretilirler fakat bu bir zorunluluk değildir. Özellikle çok kısıtlı optimizasyon problemlerinde, başlangıç bireylerini oluşturmak için, tanımlanan kısıtlamaların bir kısmına dikkat edilerek daha iyi adaylar oluşturulabilir. Bireylerin, uygunluk fonksiyonu işlemine tabi tutulması sonucunda, çözümün optimal çözüme ne kadar yaklaştığını değerlendiren uygunluk değeri belirlenir. Başlangıç popülasyonu oluşturulmuş genetik algoritma üç evrim operatörüyle çalışır. Bunlar; seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir. Genel olarak bu operatörlerin her biri, yeni nesilde oluşacak olan popülasyonun her bireyine uygulanır. Seçim işlemi, popülasyondaki bireyleri uygunluk değerlerine bağı olarak, yeni bireyleri oluşturmak için, ebeveyn birey seçmesi işlemidir. Çaprazlama operatörü, seçim işleminden sonra uygulanır ve ebeveyn bireylere ait kromozomların belirli

kısımlarının karşılıklı yer değiştirmesini ve böylece yeni özellikte bireylerin oluşmasını ifade eder. Mutasyon işlemi ise yeni oluşan bireyin kromozomlarından herhangi birinin içindeki bir geni mutasyon olasılığına bağlı olarak değiştirme işlemidir. Genetik algoritma işlemini sonlandırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; algoritmanın çalışması esnasında istenen çözüm bulunduğunda, genetik algoritmanın başlangıcında tanımlanan toplam iterasyon sayısına ulaşıldığında veya uygunluk değeri sürekli olarak sabit kaldığında, bulunan en iyi bireyin temsil ettiği çözüm, problem için bulunmuş en uygun çözüm olarak sunulur (Beasley vd. 1993). Şekil 2.28’de genetik algoritma optimizasyonunun genel akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.28 Genetik algoritma optimizasyonunun genel akışı.

Gerçek hayatta kullanılan optimizasyon problemleri genellikle birden fazla amaca sahiptir. Çok amaçlı optimizasyon problemleri birden fazla amacın eş zamanlı olarak optimize edilmesini sağlar. Çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek tek amaçlı optimizasyon problemlerine göre daha karmaşık ve zordur. Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde karar verici en iyi çözümü yerel minimum veya yerel maksimum noktasında arar. Ancak, amaç sayısı birden fazla ve birbiri ile çelişmesi durumunda tüm

amaçların en iyi çözüme ulaşması mümkün değildir. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için yöntemler geliştirilmiştir (Kaya ve Fırlalı 2018).

MATLAB programında genetik algoritma yöntemi kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirilebilir. Çok amaçlı optimizasyon ile aynı anda iki veya daha fazla sayıda hedefle optimizasyon yapmak mümkündür. Çok amaçlı optimizasyon tek amaçlı optimizasyona kıyasla daha rasyonel bir yöntemdir. Çok amaçlı optimizasyon sorunları çözmek için basit ve kullanışlı bir araçtır (Özahi vd. 2018).

Genetik algoritma kullanılarak çok amaçlı optimizasyon sonucunda Pareto çözüm kümesi bulunur. İlk olarak rastgele seçilen bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Daha sonra genetik algoritma operatörleri belirlenerek yeni nesil popülasyon elde edilir. Mevcut ve yeni popülasyon birleştirilerek baskınlık sırasına ve kalabalık uzaklığına göre sıralanır. Pareto yüzeyi belirleyen bireyler seçilir ve Pareto çözüm kümesi elde edilir. Optimizasyon süreci, optimizasyon sınırlarına bağlı olarak en iyi çözüm kümesi ortaya çıkana kadar devam eder.

2.8 Literatür Özeti

Literatürde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının doğrudan elektrik üretiminde kullanımı veya jeotermal enerjiden doğrudan ısıtma yapma gibi enerji sistemleri kullanılarak elektrik ve ısıtma-soğutma yapmaya yönelik çok sayıda araştırma olmasına karşın, jeotermal ve/veya güneş enerjisinin elektrik üretmek ve ısıtma-soğutma yapmak için kojenerasyon enerji sistemlerinde kullanılmasının YSA ile modellenmesi, termoeconomik analizi ve optimizasyonu ve ihtiyaç fazlası enerjiden hidrojen üretilerek dolayısıyla enerji depolaması yapmaya yönelik çalışmalar sınırlı sayıda. Bu bölümde sınırlı sayıdaki bu çalışmaların önemli olanlarından ve izlenecek yöntemle ilgili bazı çalışmalardan özetlenerek bahsedilmiştir.

Ratlamwala vd. (2019), ORC çevrimine dayanan, jeotermal ve güneş enerjisi ile desteklenen bir multi-generation enerji sistemi tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu sistem

ile güç ve hidrojen üretmeyi, evsel kullanım için sıcak su, iç mekân için ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Sistemin detaylı enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Farklı ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, kütleli debi ve jeotermal akışkan sıcaklık değerlerinde, sistemden elde edilen net gücü, hidrojen üretimini, sistemin enerji ve ekserji verimini araştırmışlardır. Bu parametrelerin sistem üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Behzadi vd. (2018), elektrik ve soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla jeotermal ve güneş enerji destekli bir kojenere sistem önermişlerdir. Sistemleri, konsantre bir PVT modül hücresi, çalışma sıvısı LiBr-H₂O olan absorpsiyonlu soğutucu ve jeotermal ünitesinden oluşmaktadır. Sistemin enerji, ekserji ve ekserjiekonomi analizini yapmışlardır. Farklı jeotermal sıcaklık ve PVT modülünün değişen sıcaklık ve alan değerlerinde, sistemde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir.

Siddiqui vd. (2019), elektrik-hidrojen üretmek ve soğutma yapmak için güneş ve jeotermal destekli bir multi-generation enerji sistemi geliştirmişler ve sistemin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Hidrojen üretimi için güneş enerjisi destekli heliostat alanı, elektrik üretimi için flaşlı-buhar jeotermal enerji santrali ve soğutma yapmak için ise, iş akışkanı NH₃-H₂O olan bir absorpsiyonlu soğutma sistemi düşünmüşlerdir. Farklı güneş ışınım şiddeti ve jeotermal akışkan debi değerlerinde sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir.

Acar ve Arslan (2018), Simav jeotermal sahası verilerini kullanarak güneş ve jeotermal enerji destekli ORC çevriminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Jeotermal destekli bir çevrim ile jeotermal-güneş destekli bir çevrimin net güç çıktısını, elektrik ve ekserji verimini hesaplamışlardır. Jeotermal enerji destekli çevrime güneş enerjisinin entegre edilmesiyle verimlerin azaldığını ancak net güç çıkışının artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Song vd. (2019), ORC çevrimine dayanan güneş ve jeotermal enerji destekli bir güç santralinin performans analizini yapmışlardır. Sadece jeotermal enerji destekli güç santrali ile güneş-jeotermal destekli güç santralinin termodinamik açıdan performans

değerlendirmesini yapmışlardır. MATLAB programında oluşturdukları saatlik simülasyon ile değişen güneş ışınımı ve çevre sıcaklıklarında her iki güç santralının termal verimlerini ve net güç çıkışlarını hesaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda, güneş enerjisi bakımından zengin bölgelerde enerji üretimini arttırmak için jeotermal ve güneş enerjisinin birlikte kullanılmasının yararlı olacağını belirtmişlerdir.

Khalid vd. (2017), binaların elektrik, soğutma, ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için jeotermal ve güneş enerjisi ile desteklenen bir multi-generation enerji sistemi tasarlamışlar ve bu sistemin enerji, ekserji ve Termoekonomik analizini yapmışlardır. Elektrik talebinin yoğun olduğu dönemlerde talebin karşılanması için elektroliz ünitesinde hidrojen üretimi yapıp, hidrojeni yakıt hücresinde elektriğe dönüştürmeyi planlamışlardır. Farklı ortam sıcaklıklarında sistemin enerji ve ekserji değişimlerini araştırmışlardır.

Karapekmez ve Dincer (2018), absorpsiyonlu soğutma çevrimi, ORC çevrimi ve hidrojen üretim ünitelerinden oluşan güneş ve jeotermal destekli bir multi-generation enerji sistemi önermişlerdir. Bu sistemi binaların elektrik, soğutma, ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla tasarlamışlardır. Jeotermal enerji santralının çevreye yaydığı hidrojen sülfürden hidrojen üreterek, hidrojeni yakıt hücresinde elektriğe dönüştürmeyi planlamışlardır. Sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlar, sistemde yer alan bileşenlerin entropi üretimlerini hesaplamışlardır. Farklı jeotermal akışkan akış debileri ve ortam sıcaklıklarında, sistemin enerji ve ekserji verimliliğindeki değişimleri incelemişlerdir.

Wan vd. (2019), ORC çevrimine dayanan güneş ve jeotermal enerji destekli bir hibrid enerji sistemi tasarlamışlar ve termodinamik analizini yapmışlardır. Hibrid sistemin termodinamik analizi sonucunda net güç çıkışını 12.76 MW, enerji ve ekserji verimlerini %10.74 ve %23.9 olarak hesaplamışlardır. Maksimum ekserji kaybının güneş enerjisini toplama sırasında olduğunu görmüşler ve bu kaybın sistemin toplam ekserji kaybının %33.27'sini oluşturduğunu belirtmişlerdir. Jeotermal enerjiye güneş enerjisinin entegre edilmesiyle birlikte sistemin güç üretim kapasitesinin arttığını ve hibrid sistemin verimli bir şekilde kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Ayub vd. (2015), güneş ve jeotermal enerji destekli bir hibrid model geliştirmişlerdir. Hibrid sistemi, düşük kaynak sıcaklığına sahip jeotermal saha ve oluk tip güneş kolektörü kullanan ORC çevriminden oluşturmuşlardır. Hibrid sistemin net güç çıkışını maksimize etmek için optimize etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda güneş ve jeotermal enerji destekli hibrid sistemin, jeotermal enerji destekli sisteme göre net güç çıkışında %6.3 daha iyi bir sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Hibrid sistem ile jeotermal enerji destekli sistemin seviyelendirilmiş elektrik maliyetini (LCOE) hesaplamışlar, hibrid sistemin seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin jeotermal enerji destekli sisteme göre %2 oranında daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Cardemil vd. (2018), jeotermal ve güneş enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahip kuzey Şili bölgesi için güneş ve jeotermal destekli bir hibrid sistem tasarlamışlardır. Hibrid sistemin yıllık performansını, net güç üretimi, ekserji verimi ve termoeconomik açıdan değerlendirmişlerdir. Yıllık güç üretiminde, hibrid sistemin sadece jeotermal enerji destekli sisteme göre %32 oranında daha iyi bir sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Termoeconomik analiz sonucunda minimum saatlik ortalama ekserji maliyetinin 2.179 \$/kWh olarak Kasım ayında, maksimum saatlik ortalama ekserji maliyetinin 2.258 \$/kWh olarak Temmuz ayında olduğunu gözlemlemişlerdir. Hibrid sistemin elektrik üretimini arttırmaya ve üretim maliyetlerini düşürmeye olanak sağlayan bir sistem olduğunu belirtmişlerdir.

Akrami vd. (2017), elektrik, ısıtma ve hidrojen üreten üç faydalı çıktıya sahip ORC çevrimli jeotermal enerji destekli bir sistem geliştirmişlerdir. Değişen jeotermalin kütleli debisi, türbin giriş sıcaklığı ve basınç değerlerinde sistemin enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkileri üzerine parametrik çalışmalar yapmışlardır. Belirledikleri tasarım parametre değerlerinde sistemin net elektrik gücünü 43.47 kW ve ısıtma kapasitesini 149.8 kW hesaplamışlardır. Elektroliz ünitesinde her 10.4 kW elektrik tüketimde 0.2 kg/saat oranında saf hidrojen üretilebileceğini belirtmişlerdir.

Yuksel vd. (2018), elektrik, soğutma ve hidrojen üretimi yapan jeotermal enerji destekli ORC çevrimi ile çalışan bir sistem tasarlamışlardır. Farklı çalışma şartlarında, sistemin ekserji veriminde, elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimleri

araştırmışlardır. ORC çevrimi ile üretilen elektriğin bir kısmını elektroliz ünitesinde hidrojen üretimi için kullanmışlardır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 130°C'den 200°C'ye yükselmesiyle sistemin ekserji veriminin %32'den %58'e, elektrik üretiminin 1000 kW'dan, 8000 kW'ya ve hidrojen üretiminin 0.005 kg/s'den 0.055 kg/s'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir.

Yuksel ve Ozturk (2017), elektrik, soğutma, ısıtma, sıcak su ve hidrojen üretimi yapabilen jeotermal enerji destekli ORC çevrimi çalışan bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemin enerji ve ekserji analizi ile hidrojen üretimi için termoekonomik analizini yapmışlardır. ORC çevrimi ile üretilen elektriğin bir kısmını elektroliz ünitesinde hidrojen üretimi için kullanmışlardır. Jeotermal güç santrali, ORC çevrimi, absorpsiyonlu soğutma ve elektroliz ünitesinin her biri için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda tüm sistemin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %47.04 ve %32.15 olarak hesaplamışlardır. Termoekonomik analiz sonucunda ise hidrojen üretim maliyetinin 4.8 \$/kg H₂'den 1.1 \$/kg H₂'ye azaldığını belirlemişlerdir.

Yuksel ve Ozturk (2018), elektrik, soğutma, ısıtma ve hidrojen üretimi yapabilen güneş enerjisi destekli multi-generation bir enerji sistemi geliştirmişlerdir. Sistemlerini parabolik güneş kolektörü, ORC çevirimi, absorpsiyonlu soğutma sistemi, ısıtma sistemi, enerji depolama sistemi ve hidrojen üretim ünitesinden oluşturmuşlardır. Sistemin termodinamik analizini yapmışlar ve sistemde yer alan her bir prosesin ekserji verimliliği ve ekserji kayıplarını hesaplamışlardır. Değişen ortam sıcaklıklarında her prosesin ve sistemin genel ekserji verimliliğinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir.

Moaleman ve ark. (2018), elektrik, soğutma ve ısıtma üreten güneş enerji destekli 5 kW soğutma kapasitesine sahip absorpsiyonlu soğutma ünitesinden oluşan bir sistem tasarlamışlardır. Tahran bölgesinde yer alan bir konut için bir yıllık enerji ihtiyacını hesaplayarak, geliştirdikleri sistemin binanın enerji ihtiyacını karşılamasını hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri sistemin yıllık elektrik, soğutma ve ısıtma üretimini sırasıyla 2290 kWh, 3944 kWh ve 6528 kWh olarak hesaplamışlardır. Çalışmaları

sonucunda bu sistemin tipik bir konut binasının soğutma ve ısıtma ihtiyacını tamamen karşıladığını, elektrik ihtiyacının ise %27.52'sini karşıladığını tespit etmişlerdir.

Elsavi vd. (2018), elektrik, soğutma ve ısıtma üretimi yapabilen güneş enerjisi destekli ORC çevirimi ve absorpsiyonlu soğutma ile çalışan kombine bir sistem geliştirmişlerdir. Sistem verimlerini ve kayıplarını belirlemek amacıyla sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda sistemin elektriksel verimini %8.9, kombine ısıtma ve güç verimini %96, kombine soğutma ve güç verimini %12.9 olarak hesaplamışlardır. Sistemin elektriksel, kombine ısıtma ve güç, kombine soğutma ve güç ekserji verimlerini ise sırasıyla %4.4, %12.8 ve %4.5 olarak hesaplamışlardır. Sistemin enerji ve ekserji verimleri arasında meydana gelen büyük farkın, güneş kolektöründeki yüksek ekserji kaybından dolayı olduğunu belirtmişlerdir.

El-Emam ve Dincer (2018), elektrik enerjisi üretimi ile birlikte hidrojen, soğutma, tatlı su ve sıcak su üretimi yapabilen güneş enerjisi destekli entegre bir sistem tasarlamışlardır. Sistemlerini parabolik güneş kolektörü, ORC çevirimi, absorpsiyonlu soğutma, tuz arındırma ünitesi ve elektrolizörden oluşturmuşlardır. Sistemi termodinamik olarak analiz etmişler ve sistem performansını enerji ve ekserji verimliliği yönünden değerlendirmişlerdir. Farklı türbin giriş basınç ve sıcaklık değerlerinde net güç ve sıcak su üretiminde, sistemin genel performansında meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Türbin giriş basıncının yükselmesiyle enerji ve ekserji verimliliğinin arttığını, ancak belli bir noktadan sonra azaldığını tespit etmişlerdir.

Literatür araştırmasında görüldüğü gibi, jeotermal ve/veya güneş enerjisinden elektrik üretmek ve ısıtma-soğutma yapmak için, ayrıca ihtiyaç fazlası enerjiden hidrojen üretilerek enerji depolaması yapma çalışmaları sınırlı sayıdadır. Afyonkarahisar ili jeotermal ve güneş enerjileri bakımından yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada bölgedeki jeotermal ve güneş enerji kaynakları kullanılarak alternatif enerji dönüşüm sistemlerinin modellenmesi yapılmıştır. Bu modeller güneş ve jeotermal kaynak kapasitesine uygun elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma yapan sistemler ve alternatif enerji depolama yollarını içermektedir. Bunlar güç çevrimleri, soğutma-ısıtma çevrimlerini ve jeotermal-güneş destekli hidrojen üretim ve depolama ünitelerini

içermektedir. Bu çalışmada, jeotermal ve güneş enerjisinin elektrik üretmek ve ısıtma-soğutma yapmak için kojenerasyon enerji sistemlerinde kullanılmasının YSA ile modellenmesi, termoeekonomik analizi ve optimizasyonu ve ihtiyaç fazlası enerjiden hidrojen üretilerek dolayısıyla enerji depolaması çalışmaları yapılmıştır.

Literatür çalışmalarında, kaynak genellikle yalnız elektrik üretmek veya ısıtma-soğutma yapmak için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda tek kaynak üzerine, örneğin jeotermal enerjiden yalnızca elektrik üretimi yapılmış veya güneş enerjisinden yalnızca ısıtma-soğutma yapılmıştır. Bu çalışmada ise, entegre enerji sistemleri kullanılmıştır. Yani sistem jeotermal ve/veya güneş destekli olarak elektrik üretimi yapmış, fakat elektriğe ihtiyaç olmayan zamanlarda hidrojen üretilerek enerji depolanması yapılmıştır. Aynı zamanda elektrik üretiminde atık jeotermal akışkan ve kaynaklar, ısıtma-soğutma yapılmasında kullanılmıştır. Ayrıca, sistemler MATLAB programında, YSA ile modellenerek üretilen elektriğin, yapılan ısıtma ve soğutma kapasitelerinin miktar ve maliyet tahminleri gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. Bu bağlamda sistem optimizasyonları yapılmış olacak ve uygun çevrim alternatifleri belirlenmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde, jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak farklı enerji formları (elektrik, ısıtma ve soğutma) üretilmesi için çeşitli modeller araştırılmış, bu modellerin termodinamik modelleri oluşturularak birinci ve ikinci kanun analizleri yapılmıştır. Bu modellerde jeotermal ve güneş enerjisi ile güç santralinde elektrik üretilip ihtiyaca göre şebekeye verilmesi ve şebekede ihtiyaç az olduğu zamanlarda elektriğin elektroliz yoluyla hidrojene dönüştürülerek depolanması, jeotermal ve güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sistemi kullanılarak mahal soğutma yapılması ve sistemden çıkan atık ısı enerjisi ile elektrik üretilmesi, jeotermal ve güneş enerjisi destekli binary çevriminde elektrik üretilmesi ve çevrimden çıkan atık ısı enerjisi ile mahal ısıtma yapılması gibi alternatifler değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen modellerde Afyon Jeotermal Enerji Santrali'ne (AFJES) ait değerler ve Afyon iline ait güneş ışınım değerleri dikkate alınmıştır. Bu kabullere göre, modellerin termodinamik ve termoeconomik analizleri EES programı kullanılarak, modellerin enerji ve maliyet tahminleri MATLAB programı üzerinden YSA kullanılarak ve modellerin optimizasyonu MATLAB programı üzerinden Genetik Algoritma yöntemi ile yapılmıştır. Termodinamik ve termoeconomik analizler sonucunda, seçilen modellerdeki tüm alt sistemlerin ve sistemin bir bütün olarak ekserji verimleri ve ekserji kayıpları hesaplanmış, ardından değişen jeotermal kaynak sıcaklığı ve güneş ışınım değerlerinde üretilen elektriğin, üretilen hidrojenin, yapılan ısıtma ve soğutma kapasitelerinin miktar ve maliyet tahminleri gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Son olarak modellerde üretilen elektrik, yapılan ısıtma-soğutma ve üretilen hidrojenin maliyetini minimize edecek optimum çalışma şartlarının elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 AFJES'e ait parametreler (Altun ve Kılıç 2020).

Jeotermal akışkanın kaynak sıcaklığı (°C)	130
Jeotermal akışkanı yer altına basma sıcaklığı (°C)	54.8
Jeotermal akışkanın kütleli debisi (kg/s)	85
Çevrim basınç aralığı (kPa)	500 - 2800
Çalışma akışkanı	R134a
Çalışma çevrimi	Organik Rankine çevrimi
Soğutma şekli	Su soğutmalı kondenser
Pompa ve türbin izentropik verimi	0.85

Çizelge 3.2 Afyonkarahisar iline ait güneş ışınım değerleri (Hocaoğlu 2011).

Ay	Aylık ortalama (W/m ²)	Anlık en yüksek (W/m ²)	Günlük en yüksek (W/m ²)
Ocak	202.31	650	343.15
Şubat	269.55	722	412.71
Mart	327.36	823	509.11
Nisan	394.3	955	592.38
Mayıs	507.96	1040	662.69
Haziran	545.73	1020	626.54
Temmuz	522.25	1040	634.64
Ağustos	526.8	969	607.81
Eylül	466.32	895	533.64
Ekim	348.78	766	477.8
Kasım	240.54	570	355.4
Aralık	181.77	489	285.36
Aylık genel ortalama	377.81		

3.1 Modellerin Çalışma Prensipleri

3.1.1 Model 1'in Çalışma Prensipleri

Model 1 olan bu sistemde, bölgede yer alan düşük sıcaklıklı ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynağın termodinamik özellikleri dikkate alınarak, iki akışkanlı (binary) jeotermal enerji santrali kullanılmıştır. Binary jeotermal enerji santralinde jeotermal akışkana ek olarak ikinci bir çalışma akışkanı daha kullanılmaktadır. Bu akışkanlar kapalı devre çalışan ve suya göre daha düşük sıcaklıklarda buhar fazına geçen organik akışkanlardır. Organik akışkanlar kullanılarak çalıştırılan bu çevrime organik Rankine çevrimi (ORC) denir (Ergün vd 2016). Binary jeotermal enerji santralinde elektrik üretimi ORC çevrimi ile sağlanmaktadır.

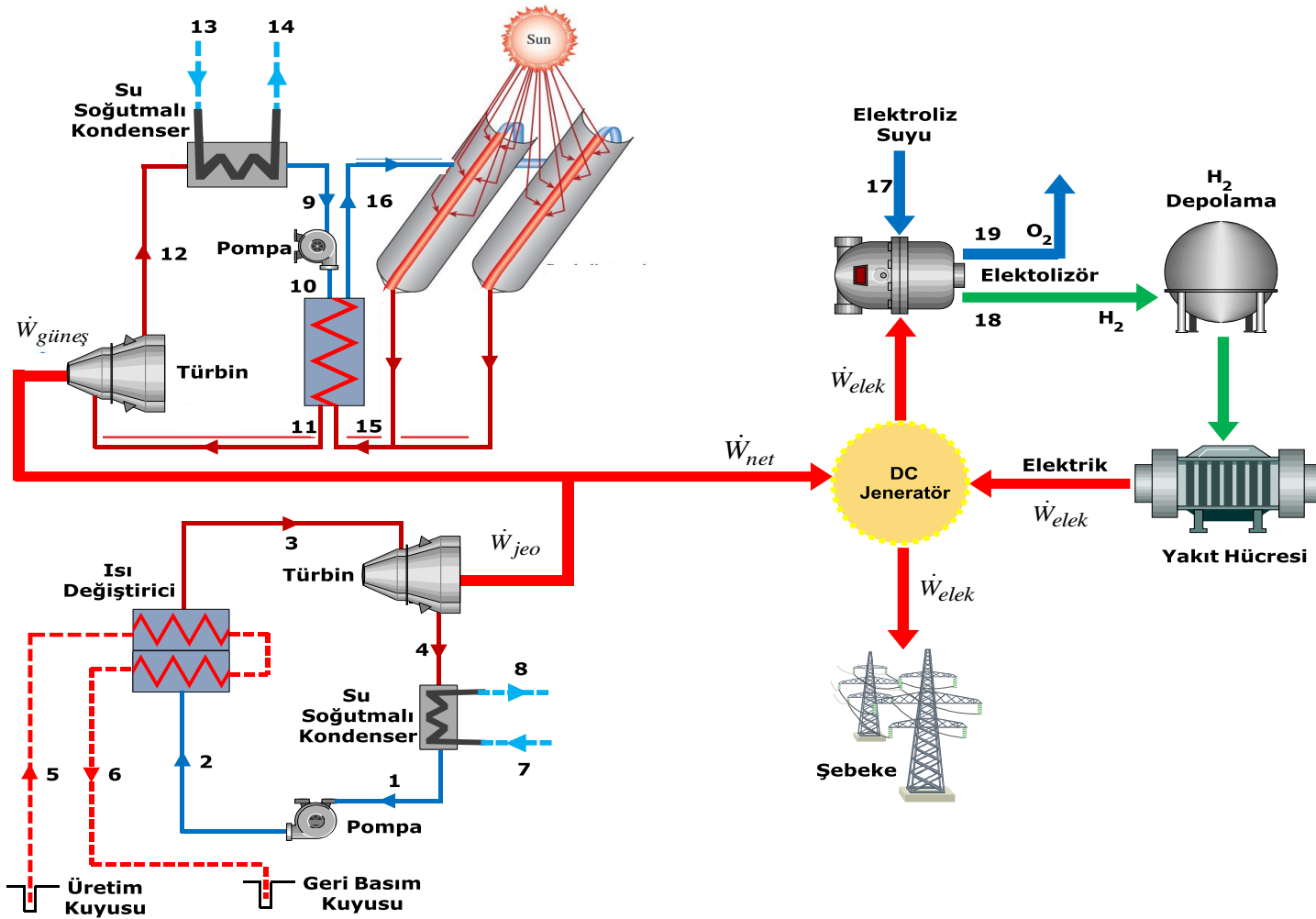
Sistemin diğer ana kaynağı olan güneş enerjisi için; yüksek çalışma sıcaklığı ve güç çıkışı, depolama kapasitesi, hibrit sistemlerle uyumu gibi avantajlarından dolayı parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali seçilmiştir. Parabolik oluklar yansıtıcının odak noktasına yerleştirilmiş bir alıcıda güneş ışığını toplamaları ile çalışır. Buradaki alıcı, yansıtıcıların odak noktaları doğrultusunda uzanan ve içinde çevrim akışkanının bulunduğu bir tüpten oluşur. Yansıtıcı, gün boyunca güneşi takip mekanizmaları ile takip eder. Çevrim akışkanı, alıcı içinde ilerletilirken 150-350°C sıcaklık aralıklarında ısınır (Yegm.gov.tr 2019). Ardından, ısı enerjisi kaynağı olarak ORC çevriminde elektrik üretimi için kullanılır.

Bu model jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir kojenere enerji sisteminden elektrik enerjisi elde edilmesi prosesidir. Model 1 jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenere sistemde güç üretiminin yapıldığı ve elektroliz ünitesi yoluyla hidrojen üretimi yapılabildiği elektrik enerjisinin depolandığı kısım olarak iki sistemden oluşmaktadır. Binary jeotermal enerji santrali çalışma sıvısı R134a olan ORC çevrimi ile çalışmaktadır. Öncelikle 5 halindeki sıvı ağırlıklı jeotermal akışkan, ORC çevriminin ısı değiştiricisine gönderilir. Jeotermal akışkan ısı değiştiricisinde ısı enerjisini ikincil akışkan olan R134a akışkanına transfer eder ve 6 halinde ısı değiştiricisinden çıkıp yer altına geri basılır. Pompa vasıtasıyla belli bir basınca basılan 2 halindeki R134a akışkanı, aldığı ısı

enerji ile ısı değiştiricisinden 3 halinde buhar olarak çıkar. Buhar fazındaki ikincil akışkan türbinden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilir ve elektrik enerjisi g kontrol ünitesine gönderilir. 4 halinde türbinden çıkan ikincil akışkan tekrardan yoğunlaştırılmak üzere su soęutmalđ kondensere gönderilir. İkincil akışkan kondenserden 1 halinde sıvđ olarak çıkar ve böylelikle ORC evrimi tamamlanır.

Kojenere sistemin ikinci enerji santrali olan parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali, ORC evrimi ile çalışmaktadır. Parabolik kollektörlerde ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1, ORC ise çalışma sıvđsđ olarak Toluene kullanılır. Güneş enerjisinden aldığı ısı enerjisi ile belli bir sıcaklığa yükselen Therminol VP-1 akışkanı 15 halinde, Toluene akışkanı ise pompa vasıtasđyla 10 halinde ısı değiştiricisine gönderilir. Therminol VP-1 akışkanı ısı değiştiricisinde ısı enerjisini ikincil akışkan olan Toluene akışkanına transfer eder ve 16 halinde ısı değiştiricisinden çıkıp parabolik kollektörlere geri gönderilir. Aldığı ısı enerjisi ile ısı değiştiricisinden 11 halinde buhar olarak çıkan ikincil akışkan türbinden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilir. Elde edilen elektrik enerjisi kullanılmak üzere g kontrol ünitesine gönderilir. 12 halinde türbinden çıkan ikincil akışkan tekrardan yoğunlaştırılmak üzere su soęutmalđ kondensere gönderilir. İkincil akışkan kondenserden 9 halinde sıvđ olarak çıkar ve böylelikle ORC evrimi tamamlanır.

Jeotermal ve güneş enerji santrallerinden g kontrol ünitesine gönderilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. şebekede elektrik ihtiyacı az olduğu zamanlarda artan elektrik elektroliz ünitesine gönderilir. Su, elektroliz ünitesinde oksijen ve hidrojene ayrıştırılır. Üretilen hidrojen gaz halinde olup depolanmak üzere yüksek basınçlı tankerlere gönderilir. şebekede elektrik ihtiyacı fazla olduğu zamanlarda depolanmış olan hidrojen elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere yakıt hücresine gönderilir. Yakıt hücresinde hidrojen elektrokimyasal bir reaksiyon (ters elektroliz) ile yanma olmadan oksijen ile birleşir ve doğru akım (DC) elektriği üretilir. Üretilen elektrik enerjisi g kontrol ünitesine gönderilir ve ardından şebekeye verilir.



Şekil 3.1 Binary jeotermal enerji santrali ve parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinde üretilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır.

3.1.2 Model 2'nin Çalışma Prensibi

Bu model jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir kojenerer enerji sisteminde elektrik enerjisinin üretildiği ve mahal soğutmanın yapıldığı bir prosestir. Model 2 ORC çevriminde güç üretiminin yapıldığı ve jeotermal ve güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma çevrimi kullanılarak mahal soğutmanın yapıldığı kısım olarak iki sistemden oluşmaktadır. Model 1'de olduğu gibi bu modelde de, bölgede yer alan düşük sıcaklıklı ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynağın termodinamik özellikleri dikkate alınarak, iki akışkanlı ORC çevrimi kullanılmıştır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminde ısı kaynağı olarak, yer altından gelen jeotermal akışkan ve parabolik güneş kollektöründe ısınan ısı transfer akışkanı kullanılmaktadır.

ORC çevrimi çalışma sıvısı olarak R134a akışkanı dolaşmaktadır. Pompa vasıtasıyla belli bir basınca basılan 2 halindeki R134a akışkanı, absorpsiyonlu soğutma çevriminden 8 halinde çıkan sıvı ağırlıklı jeotermal akışkan ve 11 halindeki Therminol VP-1 akışkanı, ORC çevriminin ısı değiştiricisine gönderilir. Jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanı ısı değiştiricisinde ısıl enerjilerinin bir kısmını, ikincil akışkan olan R134a akışkanına transfer ederler. Jeotermal akışkan 9 halinde ısı değiştiricisinden çıkıp yer altına geri basılır. Therminol VP-1 akışkanı 27 halinde pompa vasıtasıyla parabolik kollektöre geri gönderilir. R134a akışkanı, aldığı ısıl enerji ile ısı değiştiricisinden 3 halinde buhar olarak çıkar. Buhar fazındaki ikincil akışkan türbinden geçirilip, elektrik enerjisi üretmek amacıyla jeneratör ünitesine gönderilir ve elektrik enerjisi şebekeye verilir. 4 halinde türbinden çıkan ikincil akışkan tekrardan yoğunlaştırılmak üzere su soğutmalı kondensere gönderilir. İkincil akışkan kondenserden 1 halinde sıvı olarak çıkar ve böylelikle ORC çevrimi tamamlanır.

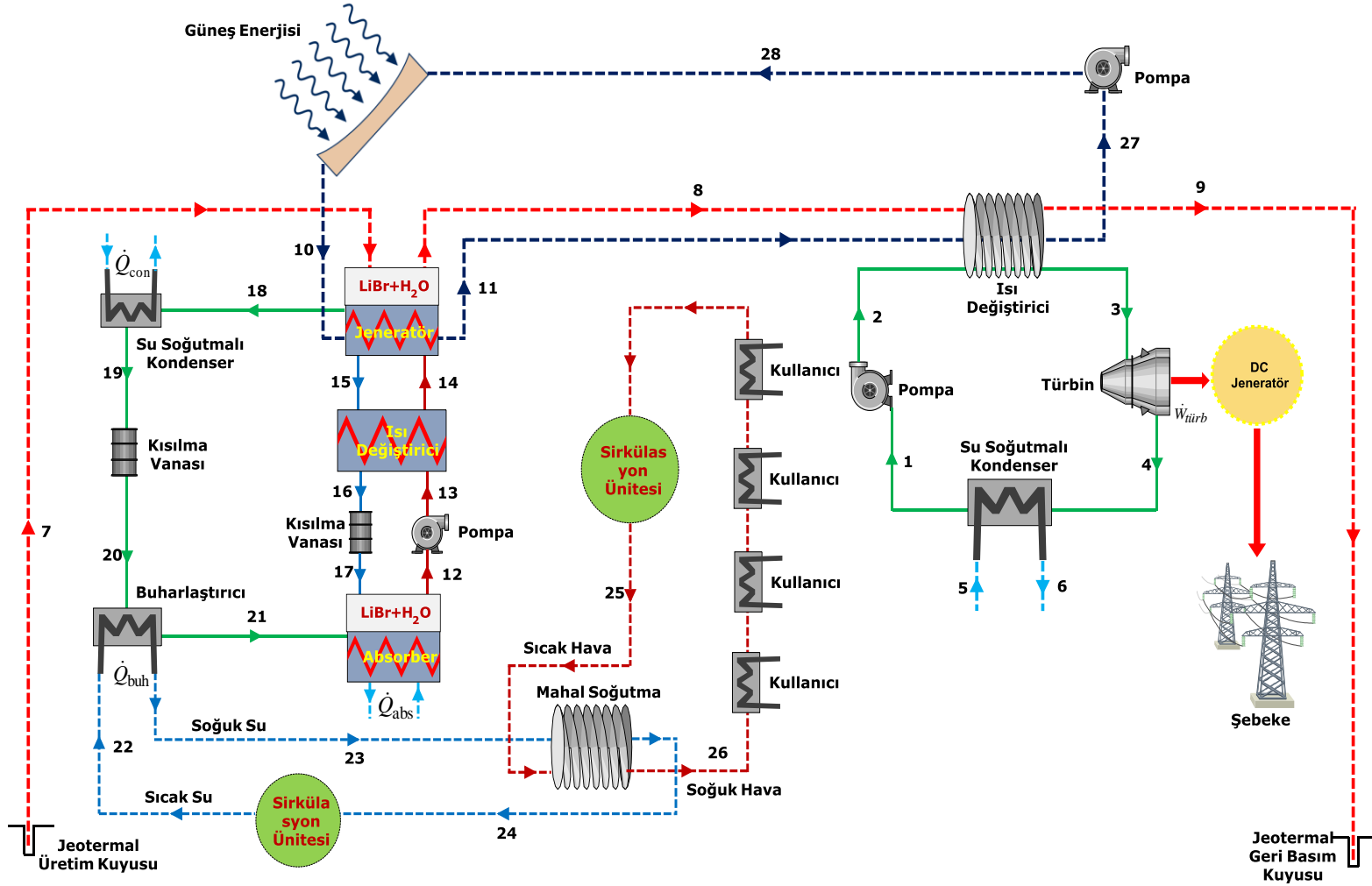
Soğutma sistemlerinin elektrik tüketimi ve enerji maliyetleri çok yüksek seviyelerdedir. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri, sıcaklığı 80°C ile 170°C arasında olan ucuz bir ısıl enerji kaynağı bulunduğu zaman, ekonomik açıdan ilgi çekici olmaktadır. Bundan dolayı absorpsiyonlu soğutma sisteminde ısı kaynağı olarak jeotermal ve güneş enerjisi kullanmak uygun olacaktır. Absorpsiyonlu soğutma çevrimleri iki akışkan çiftiyle çalışan sistemlerdir. Jeneratörde buharlaşarak soğutma işlemini yapan soğutucu akışkan

ve absorberde soğurma işlemini yapan absorbentten oluşmaktadır. Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanın bir taşıyıcı akışkan içinde soğurulması temel prensiptir. Soğutucu akışkan evaporatörde buharlaşarak soğutma yükünün ortamdaki çekilmesini sağlar (Yamankaradeniz vd. 2002).

Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde yaygın olarak LiBr-H₂O (soğutucu akışkan su) ve NH₃-H₂O (soğutucu akışkan amonyak) akışkan çiftleri kullanılmaktadır. LiBr-H₂O akışkan çiftli sistemlerde absorbent de herhangi bir buharlaşma olmadığından basit bir distilasyon yeterli olmaktadır. Fakat NH₃-H₂O akışkan çiftli sistemlerde absorbentin buharlaşabilen bir madde olması daha karmaşık bir distilasyon ünitesinin kullanılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, soğutucu akışkan buharının tam olarak ayrılabilmesi için bu sistemlerde zenginleştirme kolonu kullanılması zorunludur. Çünkü amonyakla beraber suyun buharlaştırıcıya girmesi, suyun donmasını ve sistemde istenmeyen durumların oluşmasına neden olur (Akdemir ve Güngör 2001). NH₃-H₂O çiftli soğutma sistemleri daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve daha yüksek ısı enerjisi sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar. LiBr-H₂O'lu soğutma sistemleri, soğutma uygulamaları için en uygun absorpsiyonlu sistemlerdir. LiBr-H₂O çiftinde absorbent olarak LiBr tuzu kullanılır. LiBr tuzu, sulu çözelti içindeki ve absorberdeki düşük basınçtaki kararlılığı nedeniyle avantaja sahiptir. LiBr-H₂O çiftli soğutma sistemleri, NH₃-H₂O çiftli soğutma sistemlerine göre daha düşük ısı enerjilerde çalışmaktadır ve performans katsayıları (COP) NH₃-H₂O çiftli soğutma sistemlerine göre daha yüksektir. Bu bilgiler ışığında modelde yer alan absorpsiyonlu soğutma sisteminde LiBr-H₂O çifti kullanılmıştır.

Absorpsiyonlu soğutma sistemleri buhar sıkıştırımlı sistemlere çok benzemektedir. Burada, konvansiyonel soğutma sistemlerindeki kompresörün yerini absorber, pompa, ısı değiştiricisi, kısılma vanası, jeneratör, buharlaştırıcı ve kondensör almaktadır. LiBr bakımından zayıf olan çözelti, absorberden 12 halinde çıkar ve pompa vasıtasıyla basıncı artırılarak 13 halinde ısı değiştiricisine girer. Isı değiştiricisinde ısıtılan çözelti, 14 halinde jeneratöre girer. 7 halinde yer altından gelen jeotermal akışkanın ve 10 halinde parabolik güneş kolektörlerinde ısınan Therminol VP-1 akışkanın ısı enerjisiyle, soğutucu akışkanın (su) kaynama sıcaklığı çözeltinin kaynama sıcaklığından daha düşük olduğundan, soğutucu akışkan buharlaşarak çözeltilen ayrışır. Soğutucu

akışkan buharının ayrılmasıyla jeneratörde kalan LiBr bakımından zengin çözelti, ısı değiştiricisinden geçerek 17 halinde absorbere geri döner. Jeneratörden 8 halinde çıkan jeotermal akışkan ve 11 halinde ısıtıcıdan çıkan Therminol VP-1 akışkanı ORC çevrimine gönderilir. Buharlaşarak jeneratörü terk eden soğutucu akışkan buharı (su), 18 halinde kondensöre girerek yoğuşur. Kondensörden 19 halinde çıkan soğutucu akışkan, kısılma vanasından geçerek 21 halinde buharlaştırıcıya gönderilir. Buharlaştırıcıda, soğutucu akışkan buharlaşır ve 21 halinde buharlaştırıcıdan absorbere gönderilir. Absorbere gelen soğutucu akışkan buharı, jeneratörden gelen çözelti tarafından absorbe edilir. Absorberde, LiBr bakımından zayıf olan çözelti pompa vasıtasıyla tekrar jeneratöre gönderilir ve çevrim devam eder. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıdan geçerken, 22 halinde buharlaştırıcıya giren sıcak suyun ısınısını absorbe eder ve suyun ısısı düşerek soğuk su üretilir. Buharlaştırıcıdan çıkan soğuk su 23 halinde ısı değiştiricisine gönderilir. 25 halinde ısı değiştiricisine giren sıcak hava, ısı değiştiricisinden geçerken soğuk suya ısınısını transfer eder. Isı transferi sonucunda tekrar ısınan su 24 halinde ısı değiştiricisinden çıkar ve buharlaştırıcıya geri gönderilir. Soğuk suya ısınısını transferi sonucunda soğuyan hava ısı değiştiricisinden 26 halinde soğuk hava halinde çıkar. Üretilen soğuk hava kullanıcılara gönderilerek mahal soğutma yapılır. Ardından ısınan hava tekrar soğutulmak üzere ısı değiştiricisine gönderilir ve çevrim tamamlanmış olur.



Şekil 3.2 Yer altından çıkan sıcak jeotermal akışkan ve parabolik güneş kolektöründe üretilen sıcak su, absorpsiyonlu soğutma sisteminde ısı kaynağı olarak kullanılır ve mahal soğutma yapılır. Binary enerji santralinde üretilen elektrik enerjisi şebekeye verilir.

3.1.3 Model 3'ün Çalışma Prensibi

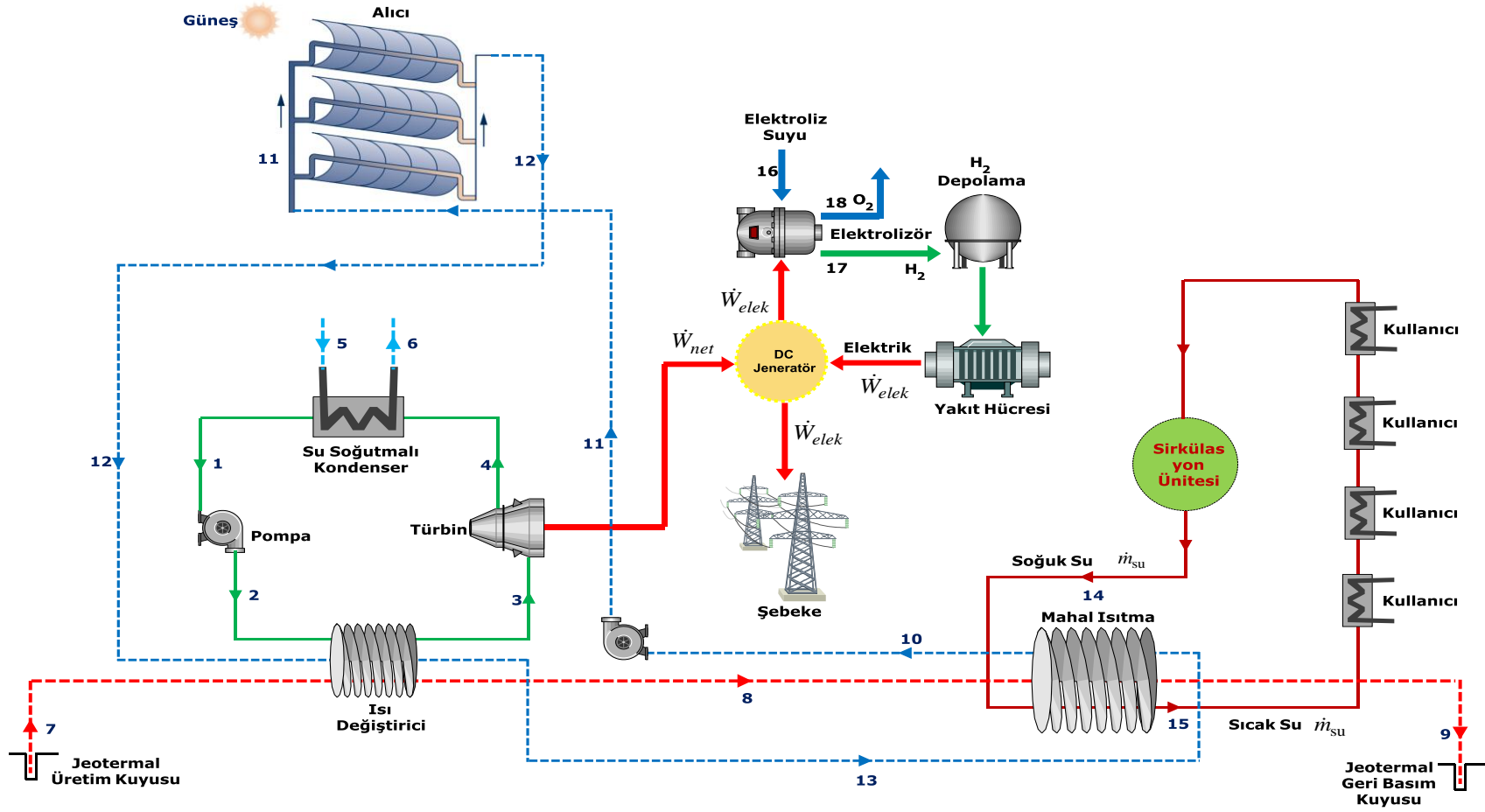
Bu model jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir kojenerasyon enerji sisteminde elektrik enerjisinin üretildiği ve mahal ısıtmasının yapıldığı bir prodestir. Model 3 jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç santralinde elektrik enerjisinin üretildiği, güç santralinden çıkan atık ısının mahal ısıtmasında kullanıldığı ve elektroliz ünitesi yoluyla hidrojen üretimi yapıp elektrik enerjisinin depolandığı kısım olarak üç sistemden oluşmaktadır. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç santrali, çalışma sıvısı R134a olan ORC çevrimi ile çalışmaktadır. Çevrimde ısı enerji kaynağı olarak, bölgede yer alan sıcak jeotermal akışkan ve parabolik oluklu kollektörlerde ısıtılan çevrim akışkanı kullanılmaktadır. Model 1'de olduğu gibi bu modelde de, yüksek çalışma sıcaklığı ve güç çıkışı, depolama kapasitesi, hibrit sistemlerle uyumu gibi avantajlarından dolayı parabolik oluklu kollektör kullanılmıştır. Parabolik oluklu kolektörde ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1 seçilmiştir.

Güneş enerjisinden aldığı ısı enerjisi ile belli bir sıcaklığa yükselen Therminol VP-1 akışkanı 12 halinde, pompa vasıtasıyla belli bir basınca basılan R134a akışkanı 2 halinde ve sıvı ağırlıklı jeotermal akışkan 7 halinde ORC çevriminin ısı değiştiricisine gönderilir. Jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanı, ısı değiştiricisinde ısı enerjilerinin bir kısmını ikincil akışkan olan R134a akışkanına transfer ederler. R134a akışkanı, aldığı ısı enerjisi ile ısı değiştiricisinden 3 halinde buhar olarak çıkar. Buhar fazındaki ikincil akışkan türbinden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilir ve elektrik enerjisi güç kontrol ünitesine gönderilir. 4 halinde türbinden çıkan ikincil akışkan tekrardan yoğunlaştırılmak üzere su soğutmalı kondensere gönderilir. İkincil akışkan kondenserden 1 halinde sıvı olarak çıkar ve böylelikle ORC çevrimi tamamlanır.

Jeotermal akışkan 8 halinde, Therminol VP-1 akışkanı 13 halinde ORC çevriminin ısı değiştiricisinden çıkarlar ve mahal ısıtması sisteminde yer alan ısı değiştiricisine gönderilirler. Jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanı ısı değiştiricisinden geçerken, 14 halinde ısı değiştiricisine giren soğuk suya ısı enerjilerini transfer ederler. Isı değiştiricisinden 9 halinde çıkan jeotermal akışkan yer altına geri basılır. 10 halinde ısı değiştiricisinden çıkan Therminol VP-1 akışkanı, tekrar ısıtılmak üzere pompa

vasıtasıyla 11 halinde parabolik oluklu kolektörlere geri gönderilir. Jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanından aldığı ısı enerjisi sonucunda ısınan su, ısı değiştiricisinden 15 halinde sıcak su olarak çıkar. Üretilen sıcak su kullanıcılara gönderilerek mahal ısıtması yapılır. Ardından soğuyan su tekrar ısıtılmak üzere ısı değiştiricisine geri gönderilir.

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç santralinden, jeneratör ünitesine gönderilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede elektrik ihtiyacı az olduğu zamanlarda artan elektrik elektroliz ünitesine gönderilir. Su, elektroliz ünitesinde oksijen ve hidrojene ayrıştırılır. Üretilen hidrojen, gaz halinde olup depolanmak üzere yüksek basınçlı tankere gönderilir. Şebekede elektrik ihtiyacı fazla olduğu zamanlarda depolanmış olan hidrojen elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere yakıt hücresine gönderilir. Yakıt hücresinde hidrojen elektrokimyasal bir reaksiyon (ters elektroliz) ile yanma olmadan oksijen ile birleşir ve doğru akım (DC) elektriği üretilir. Üretilen elektrik enerjisi jeneratör ünitesine gönderilir ve ardından şebekeye verilir.



Şekil 3.3 Jeotermal ve güneş enerjisi destekli güç santralinde üretilen elektrik enerjisi ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır. ORC çevriminin ısı değiştiricisinden çıkan jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanı, mahal ısıtma sisteminin ısı değiştiricisinde ısı kaynağı olarak kullanılır ve mahal ısıtma yapılır.

3.2 Modellerin Termodinamik Analizleri

Belirlenen modellerin termodinamik analizi için aşağıdaki bazı kabuller yapılmıştır. Modelleri termodinamik olarak ele aldığımızda, sistem bileşenlerinin her biri kontrol hacmi kabul edilerek incelenebilir. Bütün sistem ve sistem bileşenleri düzgün hal durumunda ve kontrol hacmi olarak incelenmiştir. Elektroliz işleminde hidrojen ve oksijen için ideal gaz prensibi uygulanmıştır. Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir. Ölü hal için çevre sıcaklığı ve basıncı olarak standart kabuller olan 25°C ve 100 kPa referans alınmıştır. Enerji verimliliği hesabında hidrojen için alt ısı değer referans alınmıştır. Çünkü elektroliz işleminde üretilen gaz halindeki hidrojen depolandıktan sonra içten yanmalı motorlarda veya yakıt hücrelerinde, güç veya elektrik elde etmek için kullanılırken sistem çıkışında gaz halinde bulunmaktadır. Sürekli akışlı açık bir termal sistemin her bir bileşeni için kütle, enerji, entropi ve ekserji denklemleri genel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{system} \quad (3.1)$$

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (3.2)$$

$$\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \frac{dS_{system}}{dt} \quad (3.3)$$

$$\dot{Ex}_{in} - \dot{Ex}_{out} - \dot{Ex}_{dest} = \frac{dEx_{system}}{dt} \quad (3.4)$$

Bu denklemler gerçek bir işlemden kütle ve enerjinin korunurken toplam entropinin artacağını ve toplam ekserjinin azalacağını ifade eder. Isı girişi ve güç çıkışı olan sürekli akışlı bir açık sistem için kütle, enerji, entropi ve ekserji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{in} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{out} \quad (3.6)$$

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{T_s} + \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{gen} = \dot{m}_2 s_2 \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_s} \right) + \dot{m}_1 \psi_1 = \dot{m}_2 \psi_2 + \dot{W}_{out} + \dot{E}x_{dest} \quad (3.8)$$

Bu denklemlerde; \dot{Q} ısıyı, \dot{W} işi, \dot{m} kütleli akış debisini, h durum entalpisini, 1 ve 2 sisteme giriş ve çıkış durumlarını, \dot{S}_{gen} entropi üretimini ve $\dot{E}x_{dest}$ ekserji yıkımını ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde bir giriş ve bir çıkış olduğu varsayılmıştır. Akan bir akışkanın özgül ekserji ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (3.9)$$

Burada alt indis olan 0 ölü hali (çevresel şartları), T_0 ise sistemin çalıştığı çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

Bu tür termal sistemlerin genel enerji ve ekserji verimliliğini aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{enerji} = \left(\frac{\text{ürünlerin enerjisi}}{\text{toplam enerji girdisi}} \right) \quad (3.10)$$

$$\eta_{ekserji} = \left(\frac{\text{ürünlerin ekserjisi}}{\text{toplam ekserji girdisi}} \right) \quad (3.11)$$

Bütün modellerimizdeki sistem elemanlarının termodinamik analizlerinde, kontrol hacim ve düzenli rejime sahip sistemler kabul edilerek analiz yapılmıştır. Modellerin termodinamik analizlerinde her bir model bileşeninin enerji ve ekserji analizi sonucu

alınan değerler incelenecektir. Bileşenlerin sistemden bağımsız olarak termodinamik performanslarına bakılacak ve sonradan bu sonuçların, bütün sisteme etkileri araştırılacaktır. Genel olarak modellerdeki sistem elemanları türbin, pompa ve ısı değiştirici gibi temel termodinamik elemanlardan oluşmaktadırlar. Bu çalışmada modellerimizin elemanları olan türbin, pompa ve ısı değiştirici gibi elemanlar “sürekli akışlı” koşullarda çalışıyor kabul edilmiştir. Böylece bu sistem parçalarında tersinmezliklerden kaynaklanan kayıplar incelenebilecektir. Her ne kadar gerçek çalışmalarda bu sistem elemanlarıyla çevre arasında bir miktar ısı geçişi olsa da, sürekli akışlı düzeneklerin çoğunun adyabatik şartlara yakın koşullarda çalıştığı kabul edilir. Bu nedenle termal sistemlerdeki bu elemanların incelenmesinde model hal değişimleri adyabatik olmalıdır. İdeal bir hal değişiminde tersinmezlikler yoktur, çünkü tersinmezlikler sistemden enerji kaybına yol açar. Bu nedenle izantropik hal değişimi sürekli akış düzenekleri için ideali simgeleyen bir model olarak seçilebilir. Çünkü gerçek bir hal değişimi sırasında entropi artarken, izantropik hal değişimi sırasında entropi sabit kalır. Gerçek hal değişimi ideale ne kadar yakın olursa, sistemin çalışma performansı o kadar iyi olacaktır. Bu nedenle termodinamik sistem elemanlarında gerçeğin, modele ne derece yaklaştığının sayısal ifadesi olan izantropik veya adyabatik verim parametresi kullanılmaktadır. Akışkanın kinetik veya potansiyel enerjilerindeki değişimin ihmal edildiği, sürekli akışlı adyabatik bir türbin ve pompa için izantropik verim ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir (Çengel ve Boles 2015):

$$\eta_{\text{türbin}} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.12)$$

$$\eta_{\text{pompa}} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1} \quad (3.13)$$

Burada h_1 giriş entalpi değeri, h_{2a} ve h_{2s} sırasıyla gerçek ve izantropik hal değişimleri sonunda elde edilen entalpi değerleridir. w_a ve w_s sırasıyla gerçek ve izantropik özgül işi (kJ/kg) göstermektedir. Alt indis olan s izentropik hali, alt indis a gerçek hali ifade etmektedir. Türbin için ideal hal değişimi, giriş hali ile çıkış basıncı arasındaki izantropik hal değişimidir. Türbinde amaç iş üretimi olduğuna göre türbinin izantropik

verimi, türbinde elde edilebilen gerçek işin, giriş haliyle çıkış basıncı arasında izantropik bir genişleme olması durumunda elde edilebilecek işe oranı olarak tanımlanabilir.

Adyabatik kabul edilen bir türbinin ekserji verimi, belirli bir çevrede bulunan bu sisteme belirli enerjiye sahip olarak giren akışkanın enerjisinin ne kadarının şaft işine (yararlı işe) dönüştürülebildiğinin ölçüsü olarak tanımlanabilir. Türbinin ekserji verimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Çengel ve Boles 2015):

$$\varepsilon_{\text{türbin}} = \frac{w_{\text{gerçek}}}{w_{\text{tersinir}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)} \quad (3.14)$$

Burada w_{tersinir} tersinir işi ifade eder. Tersinir iş, bir hal değişimi sırasında elde edilebilecek en çok yararlı iş çıktısı (veya en az iş girdisi, pompa gibi iş harcayan sistem elemanları için) olarak tanımlanabilir. Pompanın için ekserji verimi de benzer bir şekilde, fakat tam tersi olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Çengel ve Boles 2015):

$$\varepsilon_{\text{pompa}} = \frac{w_{\text{tersinir}}}{w_{\text{gerçek}}} = \frac{h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1)}{h_2 - h_1} \quad (3.15)$$

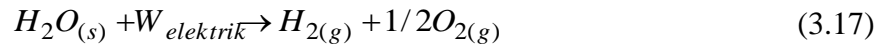
Burada pompanın tersinir işi, giriş çıkış halleri arasında elde edilen gerçek iş ve tersinmezlik arasındaki farktır. Sistemdeki akışkanların karışmadığı iki akışlı adyabatik ısı değiştiricisi için ekserji verimi, ekserjisi artan soğuk akışkanın ekserjisinin, ekserjisi azalan sıcak akışkanın ekserjisine oranı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Çengel ve Boles 2015):

$$\varepsilon_{\text{ısıdeğ}} = \frac{(\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1)_{\text{cold}}}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_2)_{\text{hot}}} = \frac{\dot{m}_{\text{cold}}[h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1)]_{\text{cold}}}{\dot{m}_{\text{hot}}[h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)]_{\text{hot}}} \quad (3.16)$$

Buradaki \dot{m}_{cold} ve \dot{m}_{hot} soğuk ve sıcak akışkanların kütleli debilerini göstermektedir. Sağlanan ekserji, sıcak akışkanın ekserjisindeki azalmadır. Elde edilen ekserji ise, soğuk akışkan sıcaklığı çevre sıcaklığı altında olmamak koşulu ile soğuk akışkanın

ekserjisindeki artıştır. Bu yaklaşım sistemdeki diğer aynı mantıkla ile çalışan su ve hava soğutmalı kondenser için de geçerlidir. Yukarıda belirtilen genel termodinamik yaklaşımlar ışığında, bütün modellerin elemanları için enerji ve ekserji denklemleri çıkarılmış ve tablo halinde verilmiştir.

Elektroliz işlemi suyun, elektrik enerjisi aracılığıyla hidrojen ve oksijene paçalanması olayıdır. Elektroliz işlemi endotermik bir termokimyasal prosesdir. Bu işlemin termodinamik analizi yapılırken moleküler haldeki entalpi ve entropi özellikleri kullanılmaktadır. Suyun elektroliz ile hidrojen ve oksijene ayrışması, elektrotlar arasındaki akım geçişiyle ve iyonik iletkenliği yüksek olan elektrolit solüsyon sıvısı ile sağlanır (Divisek 1990).



Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için elektrotlara gerekli olan minimum akımın uygulanması gerekmektedir. Bu minimum voltajı veya tersinir voltajı bulmak için Gibbs serbest enerji denklemi kullanılır. Elektroliz işlemi anot ve katot reaksiyonlar olmak üzere iki kısımdan oluşur.

Laboratuvar koşullarında bir mol suyun elektrolizi sonucu bir mol hidrojen gazı ve yarım mol oksijen gazı oluşmaktadır. Bu işlem detaylı incelendiğinde, termodinamik denklemler ve termodinamiğin birinci kanunu sonucu ortaya çıkar. Ancak bu reaksiyon gerçekleşirken 25°C ve 100 kPa koşulları göz önüne alınarak yapılır. Gibbs oluşum fonksiyonu elektroliz işlemi için gerekli olan minimum işin ifadesidir. Başka bir ifade ile bir kilogram hidrojenin üretilmesi için elektroliz ünitesine verilmesi gereken tersinir iş miktarıdır. Elektroliz işlemi, entropi artışına neden olduğundan çevre sıcaklığına katkı sağlayarak reaksiyona yardımcı olur. Gibbs serbest enerjisi, işleminin gerçekleşmesi için diğer formlardan ne kadar enerji miktarı sağlanması gerektiğini ifade etmektedir. Entalpi ve ısı oluşumuna bağlı bir fonksiyondur. Genel ifadesi şu şekildedir (Zhang vd. 2010):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.18)$$

Burada, ΔG Gibbs enerjisindeki değişim (tersinir iş veya minimum iş), T sıcaklık, ΔS ise entropi farkıdır. ΔG elektrik olarak sağlanması gereken enerjiyi $T\Delta S$ ise ısı enerjisi ifade etmektedir. ΔH reaksiyonda açığa çıkan toplam ısı enerjisini ifade etmektedir. Toplam gerekli enerji $\Delta H(T)$ 'dir. Bu termodinamik parametrelerin hepsi sıcaklığa bağlı fonksiyonlardır. Bu parametrelerin elde edildiği denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\Delta H(T) = -H_{\text{H}_2\text{O}(l)}(T) + H_{\text{H}_2}(T) + 1/2H_{\text{O}_2}(T) \quad (3.19)$$

$$\Delta S(T) = -S_{\text{H}_2\text{O}(l)}(T) + S_{\text{H}_2}(T) + 1/2S_{\text{O}_2}(T) \quad (3.20)$$

$$\Delta G(T) = -G_{\text{H}_2\text{O}(l)}(T) + G_{\text{H}_2}(T) + 1/2G_{\text{O}_2}(T) \quad (3.21)$$

Hidrojen için gerekli olan minimum (tersiniz) elektroliz işi aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir. Hidrojenin molar kütlesi M , 2.016 kg/kmol'dür (Çengel ve Boles 2015).

$$w_{\text{H}_2} = \frac{\Delta G}{M_{\text{H}_2}} \quad (3.22)$$

Burada, w_{H_2} birim kilogram hidrojenin üretilmesi için gerekli olan minimum iş miktarını göstermektedir. Bu değer elektroliz hücre verimi dikkate alındığında artmaktadır. Çalışmamızda elektroliz ünitesinin dönüşüm verimi literatürden % 75 olarak referans alınmıştır. Böylece gerçekte bir kilogram hidrojenin üretimi için gerekli iş, w_{H_2}/η hücre olarak hesaplanabilir. Sistemden üretilen hidrojenin kütleli debisi (kg/s), jeotermal santralden elde edilen ve elektroliz için kullanılan elektrik işinin (kJ/s), gerçek işe (kJ/kg H_2) oranlanarak bulunabilir:

$$\dot{m}_{\text{hidrojen}} = \frac{\dot{W}_{\text{elektrik}}}{w_{\text{H}_2,\text{gerçek}}} \quad (3.23)$$

Elektrokimyasal bir olay olan elektroliz ünitesi için verimlilik ifadesi yazılmak istenilirse, elektroliz ünitesinin enerji ve ekserji verimliği yukarıdaki termodinamik veriler de dikkate alınarak şöyle yazılabilir:

$$\eta_{\text{enerji}} = \frac{\text{LHV}_{\text{H}_2} \times \dot{m}_{\text{H}_2}}{\dot{W}_{\text{elektrik}}} \quad (3.24)$$

$$\eta_{\text{ekserji}} = \frac{\dot{E}x_{\text{H}_2}}{\dot{E}x_{\text{elektrik}}} \quad (3.25)$$

Buradaki, LHV hidrojenin alt ısıl değerini, \dot{m}_{H_2} sistemden elde edilen hidrojenin kg/s biriminde kütleli debisini, $\dot{W}_{\text{elektrik}}$ elektroliz ünitesine verilen ve jeotermal çevrimden üretilen kW biriminde net elektrik işini ve $\dot{E}x$ durum toplam ekserji değerini kW biriminde ifade etmektedir. Örneğin, denklem 3.25'de paydaki $\dot{E}x_{\text{H}_2}$ ifadesi elde edilen hidrojenin toplam ekserjisini göstermektedir.

Yakıt hücreleri en uygun ve gelecek vaat eden hidrojen teknolojilerinden biridir. Bir yakıt hücresinde hidrojen, elektrokimyasal reaksiyonda (ters elektroliz) yanma olmadan oksijen ile birleşir ve doğru akım (DC) elektriği üretir. Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEM), endüstriyel güç üretimi uygulamasında en yaygın kullanılan yakıt hücresi türüdür. Çalışma sıcaklığı tipik olarak 60 ila 80°C arasındadır. Tipik bir yakıt hücresi, her iki taraftaki anot reaksiyonu ve katot reaksiyonu ile temas halinde olan elektrolitten oluşur. Elektrokimyasal reaksiyonun geri dönüşüm (tersinir) potansiyeli, standart koşullarda (25°C 100 kPa) 1.229 V'dur ve aşağıdaki denklemlere göre Gibbs serbest enerjisine karşılık gelir. Yakıt hücresinin iş çıkışı aşağıda verilmiştir (Yılmaz ve Kanoğlu 2014).

$$w_{\text{elektrik}} = -\left(\sum n_e g_e - \sum n_i g_i\right) = -\Delta G \quad (3.26)$$

$$\dot{W}_{\text{elektrik}} = \dot{m}_{\text{H}_2} \frac{w_{\text{elektrik}}}{MW_{\text{H}_2}} \quad (3.27)$$

Burada, ΔG genel kimyasal reaksiyon için Gibbs fonksiyonundaki değişiklidir.

Modellerde kullanılan binary jeotermal enerji santralinin termodinamik analizi, ORC çevrimi ile çalıştığı dikkate alınarak yapılacaktır. Binary jeotermal enerji santraline enerji girişı aşağıdaki gibi yazılabilir (Çengel ve Boles 2015):

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{geo}(h_{geo} - h_0) \quad (3.28)$$

Burada \dot{m}_{geo} jeotermal kaynağın kütleli debisini, h_{geo} jeotermal kaynağın entalpisini ve h_0 santralin çalıştığı çevre sıcaklığının entalpisini ifade etmektedir. Santralin enerji verimi, net güç çıkışının, enerji girişine bölümü olarak tanımlanabilir:

$$\eta_{geo} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump}}{\dot{m}_{geo}(h_{geo} - h_0)} \quad (3.29)$$

Sıcaklığı T_s olan sıvı bir jeotermal kaynaktan elde edilebilecek maksimum iş:

$$w_{rev,out,geo} = c(T_s - T_0) - T_0 c \ln\left(\frac{T_s}{T_0}\right) \quad (3.30)$$

denklemleri ile bulunur. Bu denklemlerde c özgül ısı, T_s kaynak sıcaklığı ve T_0 çevre sıcaklığıdır. Binary jeotermal enerji santralinin ekserji verimi ise net güç çıkışının, tersinir işe oranı şeklinde hesaplanabilir:

$$\varepsilon_{geo} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{W}_{rev,out}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump}}{\dot{m}_{geo}[h_{geo} - h_0 - T_0(s_{geo} - s_0)]} \quad (3.31)$$

Modellerde kullanılan parabolik oluklu kolektörden elde edilen yararlı ısı, kolektörde kullanılan akışkanın giriş ve çıkış özelliklerine göre şu şekilde hesaplanabilir (Kalogirou 2013):

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_r c_p (T_{r,in} - T_{r,out}) \quad (3.32)$$

Burada \dot{m}_r alıcıda dolaşan akışkanın kütleli debisi, c_p akışkanın özgül ısısı, $T_{r,in}$ ve $T_{r,out}$ sırasıyla alıcıya giren akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığıdır.

Yararlı ısı alternatif olarak aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir (Shahin vd. 2016):

$$\dot{Q}_u = A_{ap} F_R \left(S - \frac{A_r}{A_{ap}} U_L (T_{r,in} - T_0) \right) \quad (3.33)$$

Burada A_{ap} yansıtıcı alanı, F_R kolektör ısı kazanç faktörü, S alıcı tarafından emilen ısı, A_r alıcı alanı, U_L toplam ısı kayıp katsayısı ve T_0 çevre sıcaklığıdır.

Güneş enerji santralinde kullanılan tüm parabolik kolektörlerden elde edilen toplam yararlı ısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\dot{Q}_{useful} = Col_r Col_s \dot{Q}_u \quad (3.34)$$

Burada Col_r bir sırada yatay yönde yan yana sıralı olan kolektör sayısı ve Col_s bir sütunda dikey yönde yan yana sıralı olan kolektör sayısıdır.

Alıcının ve cam örtünün yüzey alanları aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$A_r = \pi D_{r,out} L \quad (3.35)$$

$$A_c = \pi D_{c,out} L \quad (3.37)$$

Burada $D_{r,out}$ alıcının dış çapı, $D_{c,out}$ cam örtünün dış çapı ve L tek bir kolektörün uzunluğudur.

Alıcı tarafından emilen ısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$S = G\eta_r \quad (3.38)$$

Burada G güneş ışınım şiddeti ve η_r alıcının verimidir. Alıcının optik verimi ise aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$\eta_r = \rho_c \gamma \tau \alpha K_r \quad (3.39)$$

Burada ρ_c aynanın yansımaları, γ kesme faktörü, τ cam örtünün geçirgenliği, α alıcının soğurması ve K_r geliş açısı değiştiricisidir.

Yansıtıcı (diyafram) alanı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$A_{ap} = (w - D_{r,out})L \quad (3.40)$$

Burada w kollektörün genişliği, L kollektörün uzunluğu ve $D_{r,out}$ alıcının dış çapıdır.

Kollektör ısı kazanç faktörü, ısı transfer akışkanına geçen faydalı ısı enerjisinin, alıcı yüzeyinin her yerinin akışkanın giriş sıcaklığında olması halindeki ısı transfer akışkanına geçen faydalı ısı enerjisine oranı olarak ifade edilebilir:

$$F_R = \frac{\dot{m}_r c_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_c}{\dot{m}_r c_p}\right) \right] \quad (3.41)$$

Akışkana aktarılan toplam ısı kazançlarının bulunmasında kullanılan kollektör verim faktörü aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (3.42)$$

Alıcı borudan çevreye olan ısı kaybını azaltmak için alıcı borunun etrafı cam örtü ile kapatılır. Alıcı boru ile cam arasındaki alan vakumlanarak, alıcı boru ve cam arasında taşınım ile olan ısı transferi yok edilir. Bu durumda alıcı borunun dış yüzeyi ile çevre arasındaki toplam ısı kayıp katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_{c,c-a} + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (3.43)$$

Burada $h_{c,c-a}$ cam ile çevre arasındaki ısı taşınım katsayısı, $h_{r,c-a}$ cam ile çevre arasındaki ısı taşınım katsayısı, $h_{r,c-r}$ alıcı boru ile cam örtü arasındaki ısı taşınım katsayısı ve A_c camın dış alanıdır.

$$h_{c,c-a} = Nu \frac{k_{air}}{D_{c,out}} \quad (3.44)$$

$$h_{r,c-a} = \varepsilon_c \sigma (T_c - T_0) (T_c^2 + T_0^2) \quad (3.45)$$

$$h_{r,c-r} = \frac{\sigma (T_{r,av}^2 + T_c^2) (T_{r,av} + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_r^2} + \frac{A_r}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)} \quad (3.46)$$

Burada ε_r alıcı borunun yayıcılık katsayısı, ε_c camın yayıcılık katsayısı, $T_{r,av}$ alıcı borunun ortalama sıcaklığı, T_0 çevre sıcaklığı, T_c cam sıcaklığı, k_{air} havanın ısı iletim katsayısı ve $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ Stefan Boltzmann sabitidir.

Alıcı borunun içindeki ısı transfer akışkanından, çevreye olan toplam ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$U_0 = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_{r,out}}{h_{c,c-r} D_{r,in}} + \frac{D_{r,out} \ln(D_{r,out} / D_{r,in})}{2k_r} \right]^{-1} \quad (3.47)$$

Burada $D_{r,out}$ alıcı borunun dış yüzey çapı, $D_{r,in}$ alıcı borunun iç yüzey çapı, $h_{c,c-r}$ alıcı boru ile cam örtü arasındaki ısı taşınım katsayısı ve $k_r = 0.096 \text{ W/mK}$ alıcıda dolaşan Therminol-VP1 akışkanın ısı iletim katsayısıdır.

Alıcıda dolaşan ısı transfer akışkanın hızı aşağıdaki denklem ile bulunabilir:

$$V_{HTF} = \frac{\dot{m}_r}{\rho_{HTF} A_{r,c}} \quad (3.48)$$

Burada ρ_{HTF} Therminol-VP1 akışkanın yoğunluğu ve $A_{r,c}$ alıcı borunun kesit alanıdır.

Alıcı borunun kesit alanı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$A_{r,c} = \frac{\pi D_{r,in}^2}{4} \quad (3.49)$$

Önceki denklemleri hesaplayabilmemiz için, cam örtünün sıcaklığını T_c bulmamız gerekmektedir. Bu sıcaklık değeri çevre sıcaklığına yakın bir değer olacaktır. Cam tarafından absorbe edilen ışınlama olan ısı transferi ihmal edilerek, enerji dengesinden T_c değeri bulunur.

$$T_c = \frac{A_r h_{r,c-r} T_r + A_c (h_{r,c-a} + h_{c,c-a}) T_0}{A_r h_{r,c-r} + A_c (h_{r,c-a} + h_{c,c-a})} \quad (3.50)$$

Sisteme ısı girişi olan toplam güneş radyasyonu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{solar,in} = Col_s Col_r GA_{ap} \quad (3.51)$$

Parabolik oluklu kollektörün verimi aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{GA_{ap}} \quad (3.52)$$

Parabolik kollektöre, güneş enerjisi tarafından sağlanan ekserji girişi aşağıdaki şekilde hesaplanır (Bellos ve Tzivanidis 2017):

$$\dot{E}x_{solar,in} = GA_{ap} \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right) \quad (3.53)$$

Burada $T_{sun} = 5800K$ olup güneşin yüzey sıcaklığıdır.

Parabolik kollektörden yararlı ekserji çıkışı aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$\dot{E}x_u = \dot{Q}_u - \dot{m}_r c_p T_0 \ln \left(\frac{T_{r,out}}{T_{r,in}} \right) \quad (3.54)$$

Parabolik kollektörün ekserji verimi, ekserji girişinin, ekserji çıkışına oranlanması olarak tanımlanabilir:

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{E}x_u}{\dot{E}x_{solar,in}} \quad (3.55)$$

Parabolik kollektör için ekserji dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{E}x_{solar,in} = \dot{E}x_u + \dot{E}x_{PTC,dest} + \dot{E}x_{loss} \quad (3.56)$$

Burada $\dot{E}x_{PTC,dest}$ ekserji yok oluşu ve $\dot{E}x_{loss}$ termal ve optik kayıpların toplamıdır.

3.2.1 Model 1'in Termodinamik Analizi

Model 1 jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir enerji sisteminden elektrik enerjisi elde edilmesi prosesidir. Modelin termodinamik analizi, parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali, binary jeotermal enerji santrali ve tüm sistem olmak üzere 3 ana başlık altında yapılacaktır.

Modelin termodinamik analizinde, Afyon Jeotermal Enerji Santraline ait güncel jeotermal değerler ve Meteoroloji Genel Müdürlüğündeki Afyon iline ait güncel güneş enerji değerleri kullanılmıştır. Modelin termodinamik analizi, ekipmanların kontrol hacim ve sabit rejim şartlarında çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Sistemdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompaların izantropik verimleri, üretici firmaların güncel verileri kullanılarak %85 kabul edilmiştir. Modelin termodinamik analizi EES programında yapılmış ve analiz sonuçları alınmıştır.

3.2.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termodinamik Analizi

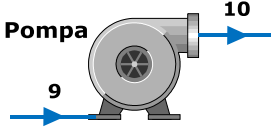

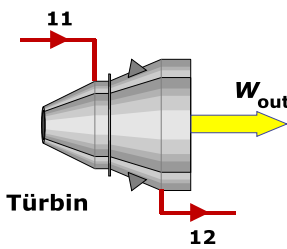
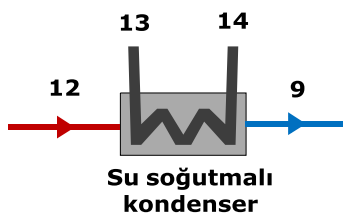
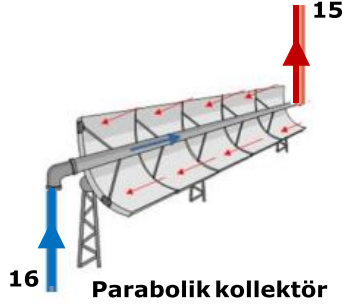
Modelde kullanılan her alt bileşenin termodinamik analizi, enerji ve ekserji denklemleri kullanılarak aşağıda verilmiştir. Parabolik kollektörlerde ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1, ORC çevriminde ise çalışma sıvısı olarak Toluene kullanılmıştır. Sistemin 25°C ve 100 kPa çevre şartlarında bulunduğu kabul edilmiştir. Parabolik kollektöre gelen güneş ışınım şiddeti, temmuz ayına ait olan 600 W/m^2 kabul edilmiştir. Alıcıya giren ısı transfer akışkanının sıcaklığı 60°C, kütleli debisi 0.2 kg/s alınmıştır. Türbinin giriş ve çıkış basınçları kızgın buhar bölgesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Böylece türbinin giriş ve çıkış basınçları sırasıyla 2000 kPa ve 10 kPa olarak seçilmiştir. Kondenserde soğutma suyu için çevre şartlarındaki sıcaklık ve basınç değerleri referans alınmıştır. Güneş enerji santralinde kullanılacak olan parabolik kollektörün geometrik değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Parabolik kollektörün geometrik değerleri.

Parametre	Sembol	Değer
Kollektör genişliği (m)	w	5
Kollektör uzunluğu (m)	L	25
Alıcı iç çapı (m)	$D_{r,in}$	0.066
Alıcı dış çapı (m)	$D_{r,out}$	0.07
Cam örtü iç çapı (m)	$D_{c,in}$	0.115
Cam örtü dış çapı (m)	$D_{c,out}$	0.121
Cam örtünün yayıcılığı	ε_c	0.87
Alıcının yayıcılığı	ε_r	0.15
Aynanın yansımaları	ρ_c	0.94
Kesme faktörü	γ	0.93
Cam örtünün geçirgenliği	τ	0.96
Alıcının soğurması	α	0.96
Geliş açısı değiştiricisi	K_r	1
Bir sıradaki kollektör sayısı	Col_r	5
Bir sütundaki kollektör sayısı	Col_s	5

Yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinin genel enerji ve ekserji denklemleri aşağıda Çizelge 3.4’de verilmiştir. Yukarıda tasarım için yapılan kabuller, optimizasyon yapılarak kontrol edilecek ve uygun çalışma şartları tespit edilebilecektir.

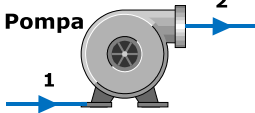

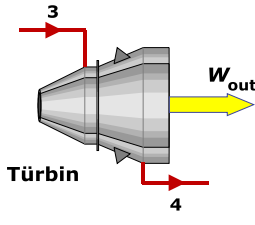
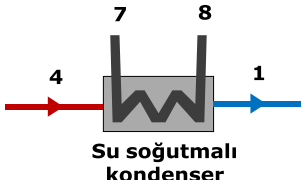
Çizelge 3.4 Yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali bileşenlerinin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.

Model alt bileşenleri	Enerji ve ekserji denklemleri
 <p>Pompa</p>	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{tol}$ $\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_9) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_{10}(ex_{10} - ex_9)$ $\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$
 <p>Isı Değiştirici</p>	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{tol} \quad \dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{HTF}$ $\dot{m}_{11}(h_{11} - h_f) = Col_s Col_r \dot{m}_{16} c_p (T_{15} - T_{tol,vap})$ $\dot{E}x_{HE,dest} = \dot{E}x_{Q_u} - \dot{m}_{11}(ex_{11} - ex_{10})$ $\varepsilon_{HE} = \frac{\dot{m}_{11}(ex_{11} - ex_{10})}{\dot{E}x_{Q_u}}$
 <p>Türbin</p>	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{tol}$ $\dot{W}_{T,gerçek} = \dot{m}_{12}(h_{11} - h_{12}) \quad \dot{W}_{T,ideal} = \dot{m}_{12}(ex_{11} - ex_{12})$ $\dot{E}x_{T,dest} = \dot{W}_{T,ideal} - \dot{W}_{T,gerçek}$ $\eta_T = \frac{h_{11} - h_{12}}{h_{11} - h_{12s}} \quad \varepsilon_T = \frac{\dot{W}_{T,gerçek}}{\dot{W}_{T,ideal}}$
 <p>Su soğutmalı kondenser</p>	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_9 = \dot{m}_{tol} \quad \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_{12}(h_{12} - h_9) = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{13})$ $\dot{E}x_{WC,dest} = \dot{m}_{13}(ex_{13} - ex_{10}) - \dot{m}_{14}(ex_{15} - ex_{14})$ $\varepsilon_{WC} = \frac{\dot{m}_{14}(ex_{14} - ex_{13})}{\dot{m}_{12}(ex_{12} - ex_9)}$
 <p>Parabolik kolektör</p>	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{HTF}$ $\dot{Q}_u = \dot{m}_{16} c_p (T_{15} - T_{16}) \quad \dot{Q}_{solar} = GA_{ap} \quad \dot{Q}_r = \eta_r \dot{Q}_{solar}$ $\dot{E}x_{PTC,dest} = \dot{E}x_{s-r,dest} + \dot{E}x_{r-f,dest}$ $\eta_c = \frac{Q_u}{Q_{solar}} \quad \varepsilon_c = \frac{\dot{E}x_{Q_u}}{\dot{E}x_{solar,in}}$

3.2.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termodinamik Analizi

Modelde kullanılan her alt bileşenin termodinamik analizi, enerji ve ekserji denklemleri Çizelge 3.5’de verilmiştir. Sistemin ısı kaynağı olan jeotermal için, Afyon jeotermal enerji santraline ait veriler kullanılmıştır. Jeotermal akışkanın sıcaklığı 130°C ve kütleli debisi 85 kg/s kabul edilmiştir. Binary güç çevriminde, R134a ikincil akışkan olarak seçilmiştir. Sistemin 25°C ve 100 kPa çevre şartlarında bulunduğu kabul edilmiştir. Türbinin giriş ve çıkış basınçları sırasıyla 2000 kPa ve 450 kPa olarak seçilmiştir. Kondenserde soğutma suyu için çevre şartlarındaki sıcaklık ve basınç değerleri referans alınmıştır. Yukarıda tasarım için yapılan kabuller, optimizasyon yapılarak kontrol edilecek ve uygun çalışma şartları tespit edilebilecektir.

Çizelge 3.5 Binary jeotermal enerji santrali bileşenlerinin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.

Model alt bileşenleri	Enerji ve ekserji denklemleri
 <p>Pompa</p>	$\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_1(ex_2 - ex_1)$ $\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$
 <p>Isı Değiştirici</p>	$\dot{m}_2(h_3 - h_f) = \dot{m}_5 c_{geo} (T_{geo} - T_{vap})$ $\dot{E}x_{HE,dest} = \dot{m}_5(ex_5 - ex_6) - \dot{m}_3(ex_3 - ex_2)$ $\varepsilon_{HE} = \frac{\dot{m}_3(ex_3 - ex_2)}{\dot{m}_5(ex_5 - ex_6)}$
 <p>Türbin</p>	$\dot{W}_{T,gerçek} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad \dot{W}_{T,ideal} = \dot{m}_3(ex_3 - ex_4)$ $\dot{E}x_{T,dest} = \dot{W}_{T,ideal} - \dot{W}_{T,gerçek}$ $\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad \varepsilon_T = \frac{\dot{W}_{T,gerçek}}{\dot{W}_{T,ideal}}$
 <p>Su soğutmalı kondenser</p>	$\dot{m}_1(h_4 - h_1) = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$ $\dot{E}x_{WC,dest} = \dot{m}_1(ex_4 - ex_1) - \dot{m}_7(ex_8 - ex_7)$ $\varepsilon_{WC} = \frac{\dot{m}_7(ex_8 - ex_7)}{\dot{m}_1(ex_4 - ex_1)}$

3.2.1.3 Tüm Sistemin Termodinamik Analizi

Daha önceki bölümlerde jeotermal ve güneş enerjisi santrali olmak üzere iki kısımda ayrı olarak incelenen sistem, bu bölümde tüm sistem bileşenleri dikkate alınarak Model 1'in genel bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Model 1'in geneli için enerji verimi, yakıt hücresinden çıkan net elektriğin, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerine giren toplam ısı enerjisine oranlanması ile hesaplanabilir:

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec}}{\dot{Q}_{geo} + \dot{Q}_{solar}} \quad (3.57)$$

Model 1'in geneli için, giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile ekserji verimi ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec}}{\dot{E}x_{geo,in} + \dot{E}x_{solar,in}} \quad (3.58)$$

3.2.2 Model 2'nin Termodinamik Analizi

Bu model jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir enerji sisteminde elektrik enerjisinin üretildiği ve mahal soğutmanın yapıldığı bir prosestir. Öncelikle jeotermal ve güneş enerjisi, absorpsiyonlu soğutma sisteminde ısı kaynağı olarak kullanılarak mahal soğutması yapılır. Ardından soğutma çevrimini terk eden jeotermal akışkan ve ısı transfer akışkanı, ORC çevriminde elektrik enerjisi üretiminde kullanılır.

Modelin termodinamik analizinde, Afyon Jeotermal Enerji Santraline ait güncel jeotermal değerler ve Meteoroloji Genel Müdürlüğündeki Afyon iline ait güncel güneş enerji değerleri kullanılmıştır. Modelin termodinamik analizi, ekipmanların kontrol hacim ve sabit rejim şartlarında çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Sistemdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompaların izantropik verimleri, üretici firmaların

güncel verileri kullanılarak %85 kabul edilmiştir. Modelin termodinamik analizi EES programında yapılmış ve analiz sonuçları alınmıştır.

Modelde kullanılan her alt bileşenin termodinamik analizi, enerji ve ekserji denklemleri kullanılarak aşağıda verilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma çevriminde akışkan çifti olarak LiBr-H₂O çifti, parabolik kollektörlerde ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1 ve ORC çevriminde ise çalışma sıvısı olarak R134a kullanılmıştır. Sistemin 25°C ve 100 kPa çevre şartlarında bulunduğu kabul edilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı 130°C ve kütleli debisi 85 kg/s kabul edilmiştir. Parabolik kollektöre gelen güneş ışınım şiddeti, temmuz ayına ait olan 600 W/m² kabul edilmiştir. Alıcıya giren ısı transfer akışkanının sıcaklığı 60°C, kütleli debisi 0.2 kg/s alınmıştır. Her iki çevrimde de yer alan kondenserlerde soğutma suyu için çevre şartlarındaki sıcaklık ve basınç değerleri referans alınmıştır. LiBr-H₂O'lu absorpsiyonlu soğutma çevriminde alçak basınç 0.8 kPa, yüksek basınç ise 10 kPa olarak seçilmiştir. LiBr-H₂O çözeltisinin fakir ve zengin eriyik konsantrasyon değerleri sırasıyla 0.5322 ve 0.6711 seçilmiştir. ORC çevriminde yer alan türbinin giriş ve çıkış basınçları sırasıyla 3000 kPa ve 700 kPa olarak seçilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma sisteminden ORC çevrimine gönderilen jeotermal akışkanın sıcaklığı 120°C ve kütleli debisi 85 kg/s kabul edilmiştir.

Bu modelde tek kademeli absorpsiyonlu soğutma çevrimi kullanılması tercih edilmiştir. Tek kademeli absorpsiyonlu soğutma çevrimleri, 70-150°C aralığındaki ısı kaynağı sıcaklıkları arasında çalışabilmektedir. Bu sıcaklık aralığında bir ısı kaynağı tek kademeli absorpsiyonlu soğutma çevrimini çalıştırmak için yeterli olacaktır, bu modelimizde kullanılan parabolik güneş kollektörünün tasarım parametrelerinde Model 1'den farklı olarak değişikliklere gidilmiştir. Kullanılacak olan parabolik kollektörün geometrik değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Parabolik kollektörün geometrik değerleri.

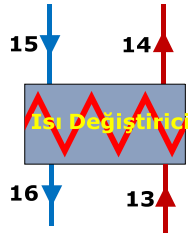
Parametre	Sembol	Değer
Kollektör genişliği (m)	w	6
Kollektör uzunluğu (m)	L	12
Alıcı iç çapı (m)	$D_{r,in}$	0.055
Alıcı dış çapı (m)	$D_{r,out}$	0.07
Cam örtü iç çapı (m)	$D_{c,in}$	0.115
Cam örtü dış çapı (m)	$D_{c,out}$	0.121
Cam örtünün yayıcılığı	ε_c	0.87
Alıcının yayıcılığı	ε_r	0.15
Aynanın yansımaları	ρ_c	0.94
Kesme faktörü	γ	0.93
Cam örtünün geçirgenliği	τ	0.96
Alıcının soğurması	α	0.96
Geliş açısı değiştiricisi	K_r	1
Bir sıradaki kollektör sayısı	Col_r	2
Bir sütundaki kollektör sayısı	Col_s	2

Hem LiBr-H₂O'lu absorpsiyonlu soğutma çevrimi hem de ORC çevrimi termodinamik olarak kontrol hacim ve sabit rejimli olarak kabul edilip, model bileşenlerine ona göre enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kütle, enerji ve ekserji denklemleri her bir eleman için, Şekil 3.2'deki hal numaraları referans alınarak, Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji sisteminin kütle, enerji ve ekserji denklemleri.

Model bileşenleri	Kütle, enerji ve ekserji denklemleri
	$\dot{Q}_{gen,in} = \dot{m}_7(h_7 - h_8) + Col_s Col_r \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11})$ $\dot{Q}_{gen,in} + \dot{m}_{14}h_{14} = +\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{18}h_{18}$ $\dot{E}x_{dest,abs} = (\dot{m}_7 ex_7 + Col_s Col_r \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{m}_{14} ex_{14}) - (\dot{m}_8 ex_8 + Col_s Col_r \dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{m}_{18} ex_{18})$
	$\dot{Q}_C = \dot{m}_{18}h_{18} - \dot{m}_{19}h_{19}$ $\dot{E}x_{dest,cond} = \dot{m}_{18}(ex_{18} - ex_{19}) - \dot{Q}_C(1 - T_0/T_H)$ $\varepsilon_{cond} = \frac{\dot{Q}_C(1 - T_0/T_H)}{\dot{m}_{18}(ex_{18} - ex_{19})}$
	$\dot{E}x_{dest,EV} = \dot{m}_{20}(ex_{19} - ex_{20})$ $\varepsilon_{ev} = \frac{\dot{m}_{20} ex_{20}}{\dot{m}_{19} ex_{19}}$
	$\dot{Q}_E = \dot{m}_{21}h_{21} - \dot{m}_{20}h_{20}$ $\dot{E}x_{dest,evap} = T_0 \left[\dot{m}_{20}(s_{21} - s_{20}) - \frac{\dot{Q}_E}{T_E} \right]$ $\varepsilon_{evap} = \frac{\dot{Q}_E(T_0 - T_E)/T_E}{\dot{m}_{20}(ex_{21} - ex_{20})}$
	$\dot{Q}_A = \dot{m}_{21}h_{21} + \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{12}h_{12}$ $\dot{E}x_{dest,abs} = \dot{m}_{21}ex_{21} + \dot{m}_{17}ex_{17} - \dot{m}_{12}ex_{12} - \dot{Q}_A \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right)$ $\varepsilon_{abs} = \frac{\dot{m}_{12}ex_{12} + \dot{Q}_A \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right)}{\dot{m}_{21}ex_{21} + \dot{m}_{17}ex_{17}}$
	$\dot{W}_{P,act} = \dot{m}_{13}h_{13} - \dot{m}_{12}h_{12} \quad \dot{W}_{P,rev} = \dot{m}_{13}ex_{13} - \dot{m}_{12}ex_{12}$ $\dot{E}x_{dest,P} = \dot{W}_{P,act} - \dot{W}_{P,rev} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,rev}}{\dot{W}_{P,act}}$

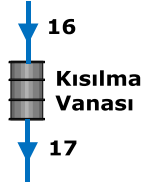
Çizelge 3.7 (Devam)



$$\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{15}h_{15} = \dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_{16}h_{16}$$

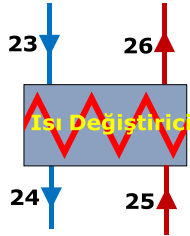
$$\dot{E}x_{dest,HE} = \dot{m}_{13}(ex_{14} - ex_{13}) - \dot{m}_{15}(ex_{15} - ex_{16})$$

$$\varepsilon_{he} = \frac{\dot{m}_{15}(ex_{15} - ex_{16})}{\dot{m}_{13}(ex_{13} - ex_{14})}$$



$$\dot{E}x_{dest,EV} = \dot{m}_{16}(ex_{16} - ex_{17})$$

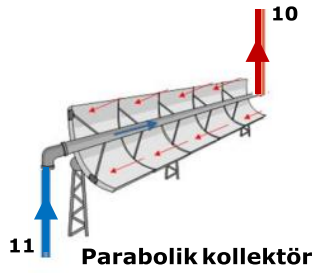
$$\varepsilon_{ev} = \frac{\dot{m}_{17}ex_{17}}{\dot{m}_{16}ex_{16}}$$



$$\dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{25}h_{25} = \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{26}h_{26}$$

$$\dot{E}x_{dest,HE} = \dot{m}_{25}(ex_{25} - ex_{26}) - \dot{m}_{23}(ex_{24} - ex_{23})$$

$$\varepsilon_{he} = \frac{\dot{m}_{25}(ex_{25} - ex_{26})}{\dot{m}_{23}(ex_{24} - ex_{23})}$$



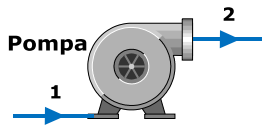
$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{10}c_p(T_{10} - T_{11})$$

$$\dot{Q}_{solar} = GA_{ap}$$

$$\dot{E}x_{PTC,dest} = \dot{E}x_{s-r,dest} + \dot{E}x_{r-f,dest}$$

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_{solar}}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{E}x_u}{\dot{E}x_{solar,in}}$$



$$\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_{10}(ex_2 - ex_1)$$

$$\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$$



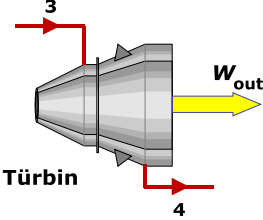
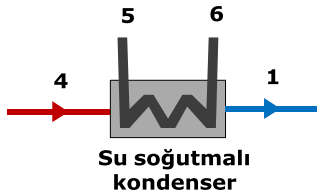
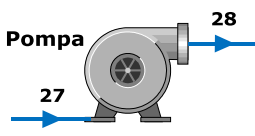
$$\dot{m}_2h_2 + \dot{m}_8h_8 + Col_s Col_r \dot{m}_{11}h_{11} =$$

$$\dot{m}_3h_3 + \dot{m}_9h_9 + Col_s Col_r \dot{m}_{27}h_{27}$$

$$\dot{E}x_{HE,dest} = \dot{m}_8(ex_8 - ex_9) + Col_s Col_r \dot{m}_{11}(ex_{11} - ex_{27}) - \dot{m}_3(ex_3 - ex_2)$$

$$\varepsilon_{he} = \frac{\dot{m}_3(ex_3 - ex_2)}{\dot{m}_8(ex_8 - ex_9) + Col_s Col_r \dot{m}_{11}(ex_{11} - ex_{27})}$$

Çizelge 3.7 (Devam)

 <p>Türbin</p>	$\dot{W}_{T,gerçek} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad \dot{W}_{T,ideal} = \dot{m}_3(ex_3 - ex_4)$ $\dot{E}x_{T,dest} = \dot{W}_{T,ideal} - \dot{W}_{T,gerçek}$ $\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad \varepsilon_T = \frac{\dot{W}_{T,gerçek}}{\dot{W}_{T,ideal}}$
 <p>Su soğutmalı kondenser</p>	$\dot{m}_1(h_4 - h_1) = \dot{m}_5(h_6 - h_5)$ $\dot{E}x_{WC,dest} = \dot{m}_1(ex_4 - ex_1) - \dot{m}_5(ex_6 - ex_5)$ $\varepsilon_{WC} = \frac{\dot{m}_5(ex_6 - ex_5)}{\dot{m}_1(ex_4 - ex_1)}$
 <p>Pompa</p>	$\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_{27}(h_{28} - h_{27}) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_{27}(ex_{28} - ex_{27})$ $\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$

Absorpsiyonlu soğutma sisteminin gerçek performans katsayı (COP) değeri, soğutma kapasitesinin, giren ısı ile pompa işinin toplamına bölünmesi ile hesaplanabilir:

$$COP_{ARC} = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{(\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_{pump})} \quad (3.59)$$

Absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji verimi aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilir:

$$\varepsilon_{ARC} = \frac{-\dot{Q}_{cooling}(T_0/T_E - 1)}{\dot{Q}_{gen}(T_0/T_G - 1)} \quad (3.60)$$

Model 2'nin geneli için enerji verimi, üretilen net elektrik enerjisi ve toplam soğutma kapasitesinin, enerji sistemine giren toplam ısı enerjisine oranlanması ile hesaplanabilir:

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec} + \dot{Q}_{cooling}}{\dot{Q}_{geo,in} + \dot{Q}_{solar,in}} \quad (3.61)$$

Model 2'nin ekserji analizinde, iç ve dış tersinmezlikler dikkate alınarak, “giren-çıkan” ekserji yaklaşımı ile sistem bileşenlerinin ekserji verimleri hesaplanmıştır. Model 2'nin geneli için, giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile ekserji verimi ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec} + \dot{Q}_{cooling}((T_0/T_E) - 1)}{\dot{E}x_{geo,in} + \dot{E}x_{solar,in}} \quad (3.62)$$

3.2.3 Model 3'ün Termodinamik Analizi

Bu model jeotermal ve güneş enerjisi destekli bir kojenerasyon enerji sisteminde, elektrik enerjisinin üretildiği ve ihtiyaca göre hidrojen enerjisine dönüştürülerek depolandığı ve aynı zamanda mahal ısıtmasının yapıldığı bir prodestir. Öncelikle jeotermal ve güneş enerjisi destekli ORC çevriminde elektrik enerjisi üretimi yapılır. İhtiyaca göre elektrik enerjisi ya şebekeye verilir ya da depolanır. ORC çevrimini terk eden jeotermal akışkan ve ısı transfer akışkanı (Therminol VP-1) mahal ısıtılmasında kullanılır.

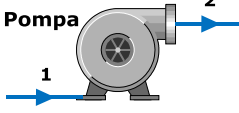

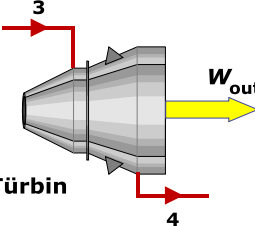
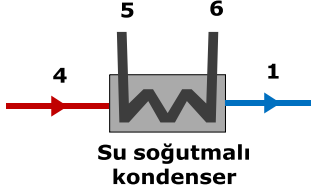
Modelin termodinamik analizinde, Afyon Jeotermal Enerji Santraline ait güncel jeotermal değerler ve Meteoroloji Genel Müdürlüğündeki Afyon iline ait güncel güneş enerji değerleri kullanılmıştır. Modelin termodinamik analizi, ekipmanların kontrol hacim ve sabit rejim şartlarında çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Sistemdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompaların izantropik verimleri, üretici firmaların güncel verileri kullanılarak %85 kabul edilmiştir. Modelin termodinamik analizi EES programında yapılmış ve analiz sonuçları alınmıştır.

Modelde kullanılan her alt bileşenin termodinamik analizi, enerji ve ekserji denklemleri kullanılarak aşağıda verilmiştir. Sistemin 25°C ve 100 kPa çevre şartlarında bulunduğu kabul edilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı 130°C ve kütleli debisi 85 kg/s kabul edilmiştir. Parabolik kollektörlerde ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1 ve ORC çevriminde ise çalışma sıvısı olarak R134a kullanılmıştır. Parabolik kollektöre gelen güneş ışınım şiddeti 600 W/m² kabul edilmiştir. Parabolik güneş kollektörünün

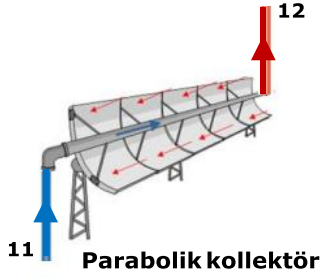
geometrik değerleri Model 1’de kullanılan parabolik güneş kolektörü ile aynı kabul edilmiş olup, sadece kolektör adetinde bir değişime gidilmiştir. Bundan dolayı parabolik güneş kolektörünün tasarım parametreleri bu modelde tekrar yazılmamıştır. Bu modelde 4 adet parabolik güneş kolektörü kullanılmıştır.

ORC termodinamik olarak kontrol hacim ve sabit rejimli olarak kabul edilip, model bileşenlerine ona göre enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kütle, enerji ve ekserji denklemleri her bir eleman için, Şekil 3.3’deki hal numaraları referans alınarak, Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Model alt bileşenleri	Enerji ve ekserji denklemleri
 <p>Pompa</p>	$\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_1(ex_2 - ex_1)$ $\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$
 <p>Isı Değiştirici</p>	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 + Col_s Col_r \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{13} h_{13}$ $\dot{E}x_{HE,dest} = \dot{m}_7(ex_7 - ex_8) + Col_s Col_r \dot{m}_{12}(ex_{12} - ex_{13}) - \dot{m}_3(ex_3 - ex_2)$ $\varepsilon_{HE} = \frac{\dot{m}_3(ex_3 - ex_2)}{\dot{m}_7(ex_7 - ex_8) + Col_s Col_r \dot{m}_{12}(ex_{12} - ex_{13})}$
 <p>Türbin</p>	$\dot{W}_{T,gerçek} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad \dot{W}_{T,ideal} = \dot{m}_3(ex_3 - ex_4)$ $\dot{E}x_{T,dest} = \dot{W}_{T,ideal} - \dot{W}_{T,gerçek}$ $\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad \varepsilon_T = \frac{\dot{W}_{T,gerçek}}{\dot{W}_{T,ideal}}$
 <p>Su soğutmalı kondenser</p>	$\dot{m}_1(h_4 - h_1) = \dot{m}_5(h_6 - h_5)$ $\dot{E}x_{WC,dest} = \dot{m}_1(ex_4 - ex_1) - \dot{m}_5(ex_6 - ex_5)$ $\varepsilon_{WC} = \frac{\dot{m}_5(ex_6 - ex_5)}{\dot{m}_1(ex_4 - ex_1)}$

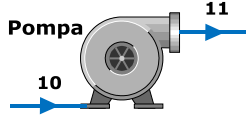
Çizelge 3.8 (Devam)



$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{11} c_p (T_{11} - T_{12}) \quad \dot{Q}_{solar} = GA_{ap}$$

$$\dot{E}x_{PTC,dest} = \dot{E}x_{s-r,dest} + \dot{E}x_{r-f,dest}$$

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_{solar}} \quad \varepsilon_c = \frac{\dot{E}x_u}{\dot{E}x_{solar,in}}$$



$$\dot{W}_{P,gerçek} = \dot{m}_{10} (h_{11} - h_{10}) \quad \dot{W}_{P,ideal} = \dot{m}_{10} (ex_{11} - ex_{10})$$

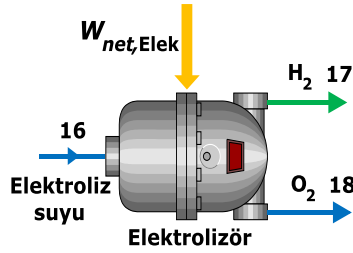
$$\dot{E}x_{P,dest} = \dot{W}_{P,gerçek} - \dot{W}_{P,ideal} \quad \varepsilon_P = \frac{\dot{W}_{P,ideal}}{\dot{W}_{P,gerçek}}$$



$$\dot{m}_8 h_8 + Col_s Col_r \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{15} h_{15}$$

$$\dot{E}x_{HE,dest} = \dot{m}_8 (ex_8 - ex_9) + Col_s Col_r \dot{m}_{10} (ex_{13} - ex_{10}) - \dot{m}_{14} (ex_{15} - ex_{14})$$

$$\varepsilon_{HE} = \frac{\dot{m}_{14} (ex_{15} - ex_{14})}{\dot{m}_8 (ex_8 - ex_9) + Col_s Col_r \dot{m}_{10} (ex_{13} - ex_{10})}$$



$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{W}_{net,elek}}{W_{gerçek,elektroliz}} \quad \dot{m}_{O_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{2}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{O_2} \quad \eta_{elek} = \frac{\dot{W}_{elektroliz}}{\dot{W}_{net,elek}}$$

$$\dot{E}x_{Elek,dest} = (\dot{E}x_{16} + \dot{W}_{net,elek}) - (\dot{E}x_{17} + \dot{E}x_{18})$$

Model 3 için enerji verimi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec} + \dot{Q}_{heating}}{\dot{Q}_{geo,in} + \dot{Q}_{solar,in}} \quad (3.63)$$

Model 3 için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,elec} + \dot{Q}_{heating} ((T_0 / T_E) - 1)}{\dot{E}x_{geo,in} + \dot{E}x_{solar,in}} \quad (3.64)$$

İhtiyaç olmadığı durumlarda elektrik enerjisinin elektroliz işlemi ile hidrojen enerjisine dönüştürülüp depolandığı ve ihtiyaç halinde yakıt hücresinde tekrar elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistem hesaba katılarak, Model 3 için genel bir enerji ve ekserji denklemi yazılmak istenmesi halinde, enerji ve ekserji denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,FC,elec} + \dot{Q}_{heating}}{\dot{Q}_{geo,in} + \dot{Q}_{solar,in}} \quad (3.65)$$

$$\varepsilon_{overall} = \frac{\dot{W}_{net,FC,elec} + \dot{Q}_{heating}((T_0/T_E) - 1)}{\dot{E}x_{geo,in} + \dot{E}x_{solar,in}} \quad (3.66)$$

3.3 Modellerin Termoekonomik Analizleri

Mühendislik Ekonomisi'nde, mühendislik sistem ve projelerinin analizinde kullanılan temel ekonomik parametreler verilir. Bir proje veya teknolojinin maliyetinin belirlenmesi mühendislik ekonomisinin temel konusudur. Belli bir projenin toplam maliyetini bulmak veya farklı opsiyonların maliyetini karşılaştırmak için farklı zamanlarda oluşacak maliyetlerin basit bir şekilde toplanması doğru değildir. Bunun nedeni paranın faiz kazanabilme etkisinden dolayı zamanla değerinin değişmesidir. Paranın mevcut değerine P, gelecekteki değerine F, periyodik eşit miktarına U, periyot sayısına n ve faiz oranına i dersek, bu parametreler arasındaki ilişkiler aşağıdaki formüllerle ifade edilir (Dhillon 2009).

$$F = P(1+i)^n \quad (3.67)$$

$$U = P \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \right] \quad (3.68)$$

$$F = U \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (3.69)$$

Bu denklemler yardımıyla farklı zamanlarda oluşan maliyetlerin ortak bir temelde ifadesi mümkün olur. Böylece bir teknolojinin maliyetini tüm ömrü için bulabiliriz. Buna ömür çevrim maliyeti (LCC) denir. Toplam ömür maliyetini bulmak için çeşitli metotlar kullanılır. Bunlardan birisi net mevcut değerdir (NPV). Bu metotta farklı zaman dilimlerinde oluşacak olan para akışları (gelir ve gider) mevcut para değerine dönüştürülür. Bu dönüşüm tek bir mevcut değer üzerinden veya periyodik eşit miktarlar halinde ifade edilebilir. Bir projenin toplam maliyetinin yıllık eşit maliyete dönüştürülmesi ile seviyelendirilmiş yıllık maliyet (LAC) bulunur. Yıllık maliyetin içinde ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım masrafları bulunur (Dhillon 2009).

Sermaye geri kazanım faktörü (CRF), faiz oranı (i) ve ekipmanın ekonomik ömrüne (n) bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.70)$$

Hidrojen üretiminde en önemli parametrelerden biri, birim kütle hidrojen üretimi için harcanan enerji miktarıdır (kWh/kg H₂). Eğer hidrojen üretimi için kullanılan enerji elektrik ise ve elektrik bir jeotermal veya güneş enerjisi santralinde üretiliyorsa, elektriğin birim kilovat-saat (kWh) maliyetinin mühendislik ekonomisi parametreleri yardımıyla hesaplanması ile \$/kWh olarak elektriğin maliyeti ve dolayısıyla birim kütle hidrojen elde etmenin maliyeti \$/kg H₂ olarak bulunur. Maliyet hesaplarının farklı modeller için yapılması ile ekonomik karşılaştırma imkânı bulunabilir.

Termoekonomi, ekserji analizi ile ekonomik prensipleri birleştiren bir disiplindir. Böylece geleneksel enerji ve ekonomik analizlerle elde edilemeyecek olan rasyonel bir maliyet yapısı elde etmekte son derece kullanışlı bir yöntemdir. Bir sistemde maliyet hesaplanırken başlangıç olarak, a) ürünlerin ve hizmetlerin gerçek maliyetlerinin tanımlanması, b) malların ve hizmetlerin fiyatlandırılması için makul bir kaynağın sağlanması, c) kontrol ve benzeri masraflar için bir finansman sağlanması, d) işletme kararlarının değerlendirilebildiği ve dayandırılabilirdiği bilgilerin sağlanması dikkate alınmalıdır. Konvansiyonel ekonomik analizde, fiyat dengesi yazılırken genellikle bütün

sistem maliyetleri aşağıdaki ilişkide ifade edildiği şekilde formüle edilebilir (Bejan vd. 1996).

$$\dot{C}_{P,TOT} = \dot{C}_{F,TOT} + \dot{Z}_{TOT}^{CI} + \dot{Z}_{TOT}^{OM} \quad (3.71)$$

Sistemin ürünü ile ilişkili maliyet değeri \dot{C}_P , ürünün üretilmesi sırasında oluşan maliyetler toplamına eşittir. Bu maliyetler, yakıt maliyeti \dot{C}_F , ilk yatırım ile ilgili maliyeti \dot{Z}^{CI} ve işletme ve bakım \dot{Z}^{OM} masraflarından oluşmaktadır. Bir yakıt ve ürün ile ilişkili tek bir akım söz konusu olduğunda, yakıt ve ürün akışı kullanılır. \dot{Z}^{CI} ve \dot{Z}^{OM} sırasıyla yıllık işletme ve bakım maliyetleri ile sermaye yatırımlarının yıllık katkılarına ve sistemin bir yılda çalıştığı zaman biriminin değerine bölünmesiyle elde edilir. Bu iki değişkenin toplamı \dot{Z} ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (3.72)$$

Maliyet, işlevsel bir ürün elde etmek için gerekli olan kaynakların fiyatlarının toplamı olarak tanımlanır. Eğer üretim prosesi eski veya verimi düşük bir proses ise maliyet, ne korunabilir kaynaklar ne de fiyat ile ilişkilidir (Lazzaretto ve Tsatsaronis 1997). Maliyet dinamik özellikleri olan bir değişkendir. Basınç ve sıcaklık gibi ölçülebilen fiziksel bir büyüklük değildir, sistemin yapısına bağlıdır ve sistem analizinin sonucu olarak ortaya çıkar. Bu nedenle fiziksel olarak hesaplanması için kaynak fiyatlarına ihtiyaç duyulur (Bejan vd. 1996, Lozano ve Valero 1993).

Termoekonomide, amortisman, ekserji, nitelik, maliyet, fiyat, kaynak, tüketim, amaç ve nedensellik kavramları birbiriyle ilişkilidir. Maliyet oluşum sürecinde, özel bir üretim akışını düzenleyen fiziksel ve mahalli mekanizmalar için analitik araştırmalar gereklidir (Reini vd. 1995). Konvansiyonel ekonomik analizde kaynaklar, bir ürünün elde edilmesinden tüketimine kadar, ara ürünlere fiziko-kimyasal nitelikler sağlayan birimler olarak kullanılmaktadır. Ekserjinin kullanılmasıyla çözülen temel problem, bu niteliklerin nasıl hesaplanacağı ve homojen hale getirileceğinin belirlenmesidir

(Tsatsaronis vd. 1994). Sistemlerdeki kütle, ısı ve iş akışlarının kullanılabilir termodinamik değerlerinin ekserji ile belirlenebilir olmasından dolayı, termal sistemlerde maliyet atanması yapılırken ekserjinin kullanılması anlamlıdır. Termoekonomi; kaçınılmaz bir biçimde çevre ile etkileşimde olan termal bir sistemin, bu etkileşimlere maliyetin atanması ile meydana gelen son derece gerçekçi bir değerlendirme yöntemidir. Bu uygulama ‘ekserjinin maliyetlendirmesi’ olarak adlandırılır. Ekserjinin maliyetlendirilmesinde her bir ekserji akımı karakteristik bir maliyetle ilişkilidir. Böylece sisteme giren ve çıkan ekserji ile ilişkili maliyet, ekserji ile ilişkili güç ve ısı akımını aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir (Bejan vd. 1996).

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i = c_i (\dot{m}_i ex_i) \quad (3.73)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}x_e = c_e (\dot{m}_e ex_e) \quad (3.74)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (3.75)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (3.76)$$

Yukarıdaki eşitliklerde c_i, c_e, c_w ve c_q sırasıyla sistem giriş ve çıkışında, iş ve ısıya bağlı birim madde akış ekserjisinin ortalama maliyetini temsil eder. Bunların maliyet oranları ise, $\dot{C}_i, \dot{C}_e, \dot{C}_w$ ve \dot{C}_q ile gösterilir. $\dot{E}x_i$ ve $\dot{E}x_e$ giriş ve çıkıştaki ekserji oranlarını, \dot{W} gücü, $\dot{E}x_q$ ısı transferi ile ilişkili ekserji oranını ifade eder. Buradan hareketle, bir sistem bileşeni için alınan ısı ve üretilen güce bağlı ekserjetik maliyet dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum_e (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k \quad (3.77)$$

Yukarıdaki eşitlik, bir sistem bileşeni için sistemden çıkan ekserji akımının toplam maliyetinin, bu maliyeti hesaplayabilmek için gerekli olan tüm harcamalara eşit olduğunu basit bir şekilde ifade eder: giren ekserji akımının maliyeti artı ilk yatırım ve

diğer maliyetler. Bu maliyet denge eşitliğinde dikkat edilmesi gerekli husus, bir bileşene iş girdiğinde (pompa ve kompresördeki gibi) sol taraftaki ikinci terim bu ifadenin sağ tarafına pozitif işaretiyle birlikte yazılmalıdır. Maliyet dengesinde tüm terimler pozitif olarak yazılır. Herhangi bir k bileşeni için giren ve çıkan ekserji oranları ekserji ilişkilerinin kullanılmasıyla hesaplanır. \dot{Z}_k terimi ilk olarak k bileşeni ile ilişkili ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetlerinin hesaplanmasıyla daha sonra sistem çalışmasının birim zamandaki (yıl, saat, saniye) seviyelendirilmiş değerlerinin hesaplanmasıyla elde edilebilir. Bu maliyetler baz alınarak k bileşeni için ilk yatırım ve bakım maliyetleri ile ilişkili maliyet oranı için genel ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Tsatsaronis vd. 1994):

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k(CRF)\phi}{(N \times 3600)} \quad (3.78)$$

Yukarıdaki eşitlikte, k bileşeninin satın alma fiyatı (\$), CRF sermaye geri kazanım faktörü, N birim yılda işletmenin çalışma saati ve işletme ve bakım maliyetine bağlı faktördür. Aslında bu maliyetlerin atanmasının temel nedeni, sistem bileşenlerine maliyetlerin paylaştırılmasını yeterli şekilde yerine getiren bir işlev oluşturmaktır. Bu işlev, evrensel, duyarlı ve kalıcı olmalıdır. En azından enerji sistemleri için kendi akış tarihinin analitik yapısını en iyi ifade eden parametrenin ekserji olduğu hakkında uluslar arası geniş bir fikir birliği vardır (Lazzaretto ve Tsatsaronis 2001).

Bir sistem içerisindeki her bir madde ve enerji akışı ile ilişkili maliyetler; her bir bileşen için yazılan maliyet dengelerinin ve yardımcı maliyet denklemlerinin yardımıyla hesaplanır. Giren ekserji akımlarının maliyetlerinden bir bileşenin bilindiği farz edilirse; çıkan akımların sayısı birden fazla olduğunda, çıkan ekserji akımlarının maliyetlerini tanımlamak için tek bir maliyet dengesi yeterli olmaz. Bu durumda göz önüne alınan bileşen için yardımcı maliyet denklemleri formüle edilmek zorundadır. Bu denklemlerin sayısı, çıkan akımların sayısının bir eksiği olur (Kwon vd. 2001, Park 1990, Lazzaretto ve Tsatsaronis 2001). Verimlilik ve yardımcı maliyet denklemlerinin formüle edilmesi için literatürde farklı uygulamalar önerilmiştir. Bu uygulamalar iki gruba ayrılabilir:

- 1) *Eksergoekonomik hesaplama metodları*: Ürün akımlarının maliyetlendirilmesini, sistemlerin ve bileşenlerinin değerlendirilmesini ve enerji sistemlerinin tekrarlayan optimizasyonunu hedefler.
- 2) *Lagrangian temelli uygulamalar*: Marjinal maliyetlerin hesaplanmasını ve tüm sistemin optimizasyonunu hedefler.

Yardımcı maliyet denklemleri; deneyimlerden, analizi yapılan sistemin amacından vb. türetilen kabullerin kullanılmasıyla çıkarılabilir. LIFO (son giren ilk çıkar) hesaplama ilkesine dayanan uygulamada (Tsatsaronis vd. 1994, Tsatsaronis ve Pisa 1994) yakıtlar, ürünler ve maliyetler tanımlanmıştır. Enerji akımı ile her bir maddeden ekserji ve maliyet eklemeleri çıkarılmaları sistematik bir şekilde kaydedilmiştir. Böylelikle, ‘yerel ortalama maliyetler’ elde edilmiş ve bir bileşende kullanılan ekserjinin birim ekserji başına maliyeti değerlendirilmiştir. Bu ilkeye dayalı yardımcı maliyet hesaplama denklemleri oluşturmak için cebirsel bir formülasyon ve bilgisayar uygulaması kullanılması analizi hızlandıracaktır (Toffolo ve Lazzaretto 2002).

SPECO uygulamasının temel ilkeleri, madde ve enerji akımlarının yerine doğrudan ekserji akımlarına uygulanmasıdır (Lazzaretto ve Tsatsaronis 2001). Bileşenlerin yakıt ve ürünlerinin sistematik bir şekilde tanımı için yerel ortalama maliyetlerin ve bu maliyetlerin hesaplamasında kullanılan yardımcı maliyet denklemlerinin çıkarılabilmesi için yakıt-ürün temeline dayanan değerlendirmenin elverişli olduğu literatürdeki çalışmalarla kanıtlamıştır. Lagrangian uygulamalar, matematiksel teknikleri benimser. Lagrangian uygulamalara örnek olarak, kısmi türevler aracılığıyla elde edilebilir hesaplama yöntemlerinin kullanıldığı yardımcı denklemler ve benzer maliyet denklemleri basit bir şekilde gösterilebilir. SPECO metodu aşağıdaki üç adımdan oluşur:

- 1) Ekserji akımlarının belirlenmesi – Termodinamik analiz
- 2) Her bir sistem bileşeni için yakıt ve ürünün belirlenmesi – SPECO
- 3) Maliyet denklemleri ve yardımcı eşitliklerin çıkarımı – Termoekonomik Analiz

Yakıt (\dot{F}), bir ekserji akımı içerisinde herhangi bir sistem bileşeninden ekserjinin çıkarılması olarak tanımlanır. Yakıtın belirlenmesinde giriş ve çıkış arasındaki ekserji farkı göz önüne alınır. Ürün (\dot{P}) ilkesi, ilgili sistem bileşeninin içindeki bir ekserji akımına ayrıca ekserji eklenmesi durumu ile ilişkilidir. Ürün ilkesi, sistem bileşeni içinde ürün olarak tanımlanan akımlara eklenecek her ekserji akımının aynı ortalama maliyette olduğunu kabul eder. Bu kural, ürün akım sayısının bir eksiği kadar ilave yardımcı denklem çıkarılmasını sağlar.

Yukarıda verilen denklemler ve yapılan ekonomik ve termoekonomik yaklaşımlar kapsamında, kullanılmak üzere bazı kabuller yapılmak zorundadır. Modellerde kullanılan ekipmanların satın alma maliyetlerinin (PEC) hesaplandığı Aspen Plus programı kapsamında, programın güncel ekonomik veriler dâhilinde kullanmış olduğu ekonomik kabuller ve datalar referans alınmıştır. Bu bağlamda modellerin çalışma kapasitesi, yenilenebilir sistemler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ekonomik analizlerde kullanılmak üzere, program kapsamında kullanılan yıllık faiz oranı (i , interest rate) %10 olarak referans alınmıştır. Geliştirilen modeller piyasada ve sektörde santral olarak mevcut olmadığından jeotermal enerji santrali, güneş enerji santrali ve elektroliz ünitesinin ömürleri dikkate alınarak, Model 2 ve Model 3'ün ömürleri ortalama değer olarak alınmıştır. Termoekonomik kısım ise sonuçlar EES programında yazılarak, her model için gerekli termoekonomik bağlantılar yazılarak termoekonomik ilişki tabloları oluşturulmuştur.

3.3.1 Model 1'in Termoekonomik Analizi

Modelin termoekonomik analizi, 3 ana başlık altında yapılacaktır. Güneş ve jeotermal enerji santrallerinin termoekonomik analizleri ayrı değerlendirilecek, elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin termoekonomik analizler ayrı değerlendirilecektir. Bu işlemin yapılmasındaki amaç bu modelde yer alan iki ayrı enerji santralinin, yıllık çalışma saatlerinin ve ekonomik ömürlerinin farklılık gösteriyor olmasıdır. Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin termoekonomik analizinde ise, her iki ekipmanında yıllık çalışma saati ve ekonomik ömrü, jeotermal enerji santrali ile aynı kabul edilmiştir. Çünkü bu

modelde elde edilen elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu jeotermal enerji santralinden sağlanmaktadır ve jeotermal enerji santralinin yıllık çalışma saati daha uzundur.

3.3.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin

Termoekonomik Analizi

Güneş enerji santralının yıllık çalışma saati 6800 saat ve ekonomik ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde kullanılan yıllık faiz oranı (i, interest rate) %10 olarak referans alınmıştır. Yapılan ekonomik kabuller kapsamında, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) değeri 0.1102 olarak hesaplanmıştır.

Matematiksel olarak, modelin tüm alt bileşenlerinden çıkan ekserji akımlarının toplamına eşit sayıda (n) bilinmeyen vardır ve altıncı bölümde ifade edilen maliyet denge denklemi tek başına bu bilinmeyenleri hesaplamak için yeterli değildir. Dolayısıyla bilinmeyenlerin sayısından bir eksik (n-1) yardımcı eşitlik tanımlanmalıdır. Yardımcı eşitlikler özgül ekserji maliyetlendirme (SPECO) yönteminin, yakıt (F) ve ürün (P) prensiplerinden yararlanarak geliştirilebilir (Lazzaretto ve Tsatsaronis 2006).

Yakıt (F) prensibi, herhangi bir sistem alt bileşenine giren akışı, o bileşenin “yakıtı” olarak tanımlar ve bu akışın maliyetini bir önceki akışların ortalama ekserji maliyetlerine eşit olarak ifade eder. Diğer taraftan ürün (P) prensibi, herhangi bir sistem bileşeninin “ürün” akışını, sisteme giren yakıt akışının maliyetine eşit kabul eder. Bu tez çalışmasında, SPECO yöntemi temel alınarak, geliştirilen modeller için F ve P prensipleri yardımıyla her bir model bileşeni için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemi Güneş Enerji Santrali için Çizelge 3.9’da verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında EES programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Çizelge 3.9 Güneş enerji santralini oluşturan ekipmanların ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Pompa	$\dot{C}_9 + \dot{Z}_P + \dot{C}_{WP} = \dot{C}_{10}$	c_9 (biliniyor) c_{10} (değişken)
Isı değiştirici	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_{11} + \dot{C}_{16}$	-
Türbin	$\dot{C}_{11} + \dot{Z}_T = \dot{C}_{WT} + \dot{C}_{12}$	$c_{11} = c_{12}$ $c_{elektrik}$ (değişken)
Su soğutmalı kondenser	$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{14}$	$c_{13} = c_{elektrik}$
Parabolik kollektör	$\dot{C}_{16} + \dot{Z}_{PTC} = \dot{C}_{15}$	c_{16} (biliniyor)

3.3.1.2 Jeotermal Enerji Santralinin Termoekonomik Analizi

Jeotermal enerji santralinin yıllık çalışma saati 7446 saat ve ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde kullandığımız yıllık faiz oranı (i, interest rate) % 10 olarak kabul edilmiştir. Yapılan ekonomik kabuller kapsamında, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) değeri 0.1175 olarak hesaplanmıştır.

SPECO yöntemi temel alınarak, geliştirilen modeller için F ve P prensipleri yardımıyla jeotermal enerji santralinin bileşenleri için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri jeotermal enerji santrali için Çizelge 3.10'da verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında EES programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Çizelge 3.10 Jeotermal enerji santralının alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Pompa	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_P + \dot{C}_{WP} = \dot{C}_2$	c_1 (biliniyor) c_2 (değişken)
Isı değiştirici	$\dot{C}_2 + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_3 + \dot{C}_6$	$c_5 = c_6$
Türbin	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_T = \dot{C}_{WT} + \dot{C}_4$	$c_3 = c_4$ $c_{elektrik}$ (değişken)
Su soğutmalı kondenser	$\dot{C}_4 + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_1 + \dot{C}_8$	$c_7 = c_{elektrik}$

3.3.1.3 Elektroliz Ünitesinin ve Yakıt Hücresinin Termoekonomik Analizi

Elektroliz ünitesinin ve yakıt hücresinin yıllık çalışma saati 7446 saat ve ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde kullandığımız yıllık faiz oranı (i, interest rate) % 10 olarak kabul edilmiştir. Yapılan ekonomik kabuller kapsamında, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) değeri 0.1175 olarak hesaplanmıştır.

SPECO yöntemi temel alınarak, geliştirilen modeller için F ve P prensipleri yardımıyla elektroliz ünitesi ve yakıt hücresi için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri Çizelge 3.11’de verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında EES programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Çizelge 3.11 Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Elektroliz ünitesi	$\dot{C}_{17} + \dot{C}_{W_{PTC}} + \dot{C}_{W_{geo}} + \dot{Z}_{elect} = \dot{C}_{18} + \dot{C}_{19}$	c_{17} (biliniyor) $c_{17} = c_{19}$ c_{18} (değişken)
Yakıt hücresi	$\dot{C}_{18} + \dot{Z}_{PEM} = \dot{C}_{W_{PEM}}$	c_{18} (biliniyor)

3.3.2 Model 2'nin Termoekonomik Analizi

Bu modelde jeotermal ve güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma çevrimi ve enerji santrali bir arada ele alınarak termoekonomik analizler yapılmıştır. Öncelikle Aspen Plus programında soğutma çevrimi ve enerji santrali kodlanıp çalıştırılarak, ekipmanların satın alma maliyetleri elde edilmiştir. Ardından EES programında, Model 2 için hesaplanmış gerekli veriler tarafımızdan programa kodlanarak termoekonomik analiz sonuçları elde edilmiştir.

Bilindiği üzere günümüzde güncel ekonomik verilere ulaşmak çok zordur. Bu ekonomik veriler bazı yaklaşımlar ile hesaplanabilse de, bu işlem çok uzun vakitler almaktadır ve sonuçların doğruluğu kesin değildir. Bütün bu sevelerden dolayı, termoekonomik analizlerimizde Aspen Plus programından yararlanmak bize büyük bir avantaj ve kolaylık sağlamaktadır. Bu program ile hem enerji analizi yapmak hem de termal sistemlerin geçmişteki ve günümüzdeki bütün ekonomik verilerine ve sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyetlerine ulaşmak mümkün olmaktadır.

Model 2 için yıllık çalışma saati 7446 saat ve ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde kullandığımız yıllık faiz oranı (i, interest rate) %10 olarak kabul edilmiştir. Yapılan ekonomik kabuller kapsamında, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) değeri 0.1175 olarak hesaplanmıştır.

SPECO yöntemi temel alınarak, geliştirilen modeller için F ve P prensipleri yardımıyla Model 2 bileşenleri için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemi Model 2 için Çizelge 3.12’de verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında EES programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Çizelge 3.12 Model 2 alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
ORC-Pompa	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_P + \dot{C}_{WP} = \dot{C}_2$	c_1 (biliniyor) c_2 (değişken)
ORC-Isı değiştirici	$\dot{C}_2 + \dot{C}_8 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_3 + \dot{C}_9 + \dot{C}_{27}$	$c_8 = c_9$
ORC-Türbin	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_T = \dot{C}_{WT} + \dot{C}_4$	$c_3 = c_4$ $c_{elektrik}$ (değişken)
ORC-Kondenser	$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_1 + \dot{C}_6$	$c_5 = 0$
Pompa-1	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_P + \dot{C}_{WP} = \dot{C}_{13}$	c_{12} (biliniyor)
Isı değiştiricisi-1	$\dot{C}_{13} + \dot{C}_{15} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{16}$	$c_{15} = c_{16}$
Jeneratör	$\dot{C}_7 + \dot{C}_{10} + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{GEN} = \dot{C}_8 + \dot{C}_{11} + \dot{C}_{15} + \dot{C}_{18}$	$c_7 = c_8$
Kondenser	$\dot{C}_a + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{CON} = \dot{C}_b + \dot{C}_{19}$	$c_a = 0$
Evaporatör	$\dot{C}_{20} + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{EVA} = \dot{C}_{21} + \dot{C}_{23}$	$c_{22} = 0$ $c_{20} = c_{21}$
Absorber	$\dot{C}_c + \dot{C}_{17} + \dot{C}_{21} + \dot{Z}_{ABS} = \dot{C}_d + \dot{C}_{12}$	$c_c = 0$
Isı değiştiricisi-2	$\dot{C}_{23} + \dot{C}_{25} + \dot{Z}_{DHE} = \dot{C}_{24} + \dot{C}_{26}$	$c_{25} = 0$ $c_{23} = c_{24}$
Parabolik kolektör	$\dot{C}_{28} + \dot{Z}_{PTC} = \dot{C}_{10}$	c_{28} (biliniyor)

3.3.3 Model 3'ün Termoekonomik Analizi

Bu modelde jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji santrali ile enerji santralinde üretilen elektriğin hidrojene dönüştürüldüğü elektroliz ünitesi ve hidrojenin tekrardan elektriğe dönüştürüldüğü yakıt hücresi bir arada ele alınarak termoekonomik analizler yapılmıştır. Öncelikle Aspen Plus programında jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji santrali kodlanıp çalıştırılarak, santralde yer alan ekipmanların satın alma maliyetleri elde edilmiştir. Ardından EES programında, Model 3 için hesaplanmış gerekli veriler tarafımızdan programa kodlanarak termoekonomik analiz sonuçları elde edilmiştir.

Model 3 için yıllık çalışma saati 7446 saat ve ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde kullandığımız yıllık faiz oranı (i, interest rate) %10 olarak kabul edilmiştir. Yapılan ekonomik kabuller kapsamında, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) değeri 0.1175 olarak hesaplanmıştır.

SPECO yöntemi temel alınarak, geliştirilen modeller için F ve P prensipleri yardımıyla Model 3 bileşenleri için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri Model 3 için Çizelge 3.13'de verilmiştir. Teknik kabuller yapılarak yardımcı eşitlikler yazılmış ve buna göre bilgisayar ortamında EES programında kodlanarak çözümlenmiştir.

Çizelge 3.13 Model 3 alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Model bileşenleri	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Pompa	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_P + \dot{C}_{WP} = \dot{C}_2$	c_1 (biliniyor) c_2 (değişken)
Isı değiştirici	$\dot{C}_2 + \dot{C}_7 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_3 + \dot{C}_8 + \dot{C}_{13}$	c_7 (biliniyor) $c_7 = c_8$
Türbin	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_T = \dot{C}_{WT} + \dot{C}_4$	$c_3 = c_4$ $c_{elektrik}$ (değişken)

Çizelge 3.13 (Devam)

Su soğutmalı kondenser	$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_1 + \dot{C}_6$	$c_5 = c_{elektrik}$
Isı değiştirici-2	$\dot{C}_8 + \dot{C}_{13} + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{10} + \dot{C}_{15}$	$c_8 = c_9$ $c_{14} = c_{elektrik}$
Elektroliz ünitesi	$\dot{C}_{16} + \dot{C}_{W_{PTC}} + \dot{C}_{W_{geo}} + \dot{Z}_{elect} = \dot{C}_{17} + \dot{C}_{18}$	c_{16} (biliniyor) $c_{16} = c_{18}$ c_{17} (değişken)
Yakıt hücresi	$\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{PEM} = \dot{C}_{W_{PEM}}$	c_{17} (biliniyor)
Parabolik kollektör	$\dot{C}_{11} + \dot{Z}_{PTC} = \dot{C}_{12}$	c_{11} (biliniyor)

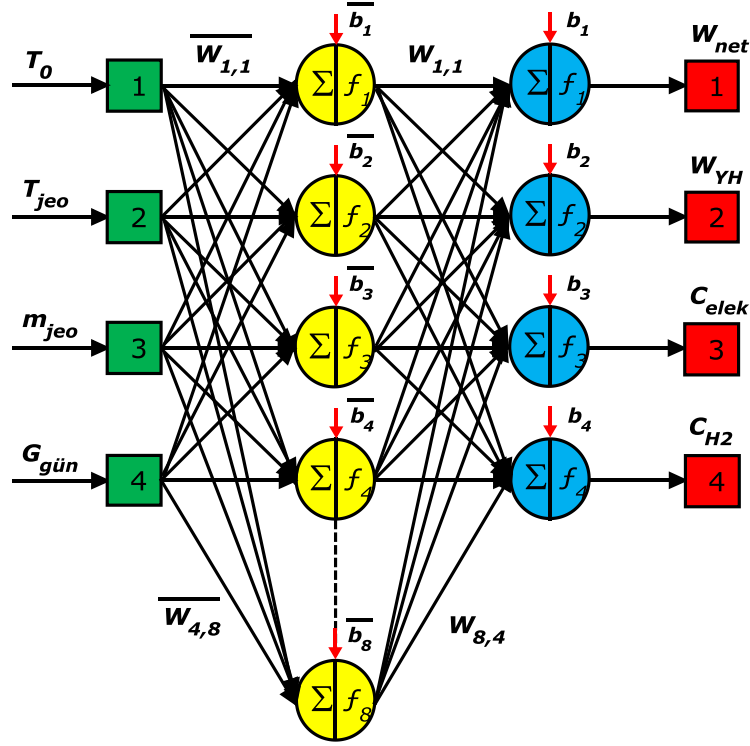
3.4 Modellerin YSA Yöntemi ile Güç ve Maliyet Tahmini

Termodinamik ve termoekonomik analizleri yapılan modellerin, MATLAB programı üzerinde YSA yöntemi kullanılarak eğitilen ağ sonucunda güç ve maliyet tahminleri yapılmıştır. YSA’da eğitilen ağın tahmin başarısını ölçebilmek için ortalama mutlak hata, ortalama kare hata, kök ortalama kare hata ve ortalama mutlak yüzde hata değerleri her model için hesaplanmıştır. Gerçek analiz sonuçları ile YSA’nın tahmin sonuçları karşılaştırılıp değerlendirilmiş ve grafik üzerinde gerçek analiz ve tahmin sonuçları gösterilmiştir.

3.4.1 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 1 için Güç ve Maliyet Tahmini

İlk olarak, EES programı kullanılarak sistemin YSA tabanlı modellemesinde kullanılmak üzere 100X8 veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti eğitim için 80X8 ve test için 20X8 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA’da modellenen sistem 4 adet giriş ve 4 adet çıkıştan oluşmaktadır. Girişler çevre sıcaklığı, jeotermal kaynak sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve güneş ışınım şiddetidir. Çıkışlar sistemin güç üretim kapasitesi, yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi, üretilen elektriğin ve hidrojenin maliyetidir. Bu işlemin ardından ileri beslemeli çok katmanlı 4 giriş ve 4 çıkışa sahip

YSA yapısı MATLAB üzerinde oluşturulmuştur. Model 1 için 4-8-4 yapısının ileri beslemeli çok katmanlı YSA blok diyagramı Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 YSA tabanlı Model 1 için blok diyagramı.

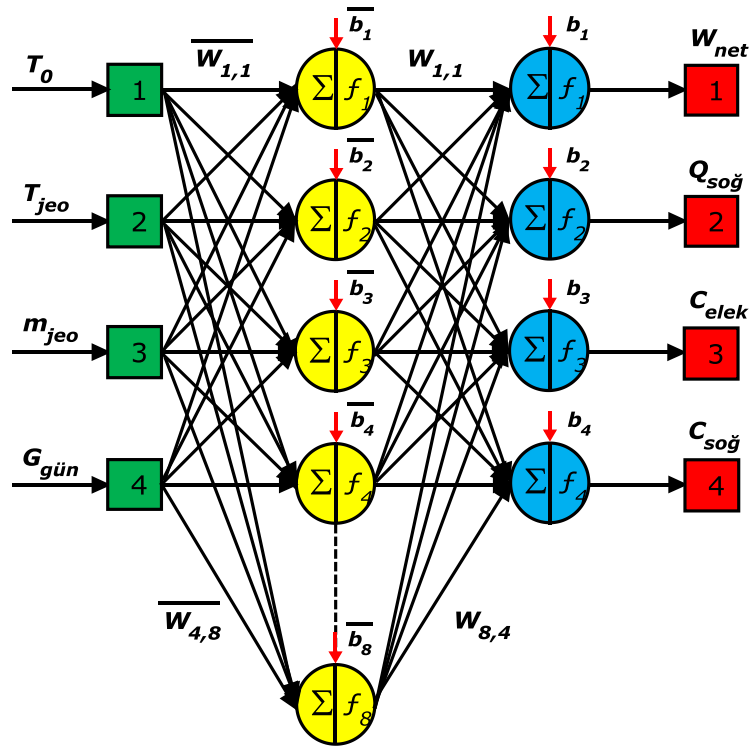
YSA yapısında bir gizli katmanda sekiz nöron vardır ve Tanjant Sigmoid transfer fonksiyonu, her bir nöronda transfer fonksiyonu olarak kullanılır. Çıkış katmanında bulunan dört nöronda ise Purelin transfer fonksiyonu kullanılır. YSA tabanlı model ile ilgili parametreler Çizelge 3.14’de verilmiştir.

Çizelge 3.14 Model 1 için YSA parametreleri.

YSA Parametreleri	Özellikler
Katmanların sayısı	3
Katmanlardaki nöronların sayısı	Giriş: 4 - Gizli: 8 - Çıkış: 4
Başlangıç ağırlıkları ve bias değerleri	Rastlantsal
Transfer fonksiyonu	Gizli: TanSig - Çıkış: Purelin
Öğrenme kuralı	Levenberg-Marquardt geri yayılım

3.4.2 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 2 için Güç ve Maliyet Tahmini

Öncelikle, EES programı kullanılarak gerçek sistemin YSA tabanlı modellenmesinde kullanılmak üzere 100X8 veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti eğitim için 80X8 ve test için 20X8 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA'da modellenen sistem 4 adet giriş ve 4 adet çıkıştan oluşmaktadır. Girişler çevre sıcaklığı, jeotermal kaynak sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve güneş ışınım şiddetidir. Çıkışlar güç üretim kapasitesi, soğutma kapasitesi, üretilen elektrik ve yapılan soğutma maliyetidir. Bu işlemin ardından ileri beslemeli çok katmanlı 4 giriş ve 4 çıkışa sahip YSA yapısı MATLAB üzerinde oluşturulmuştur. Model 2 için 4-8-4 yapısının ileri beslemeli çok katmanlı YSA blok diyagramı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 YSA tabanlı Model 2 için blok diyagramı.

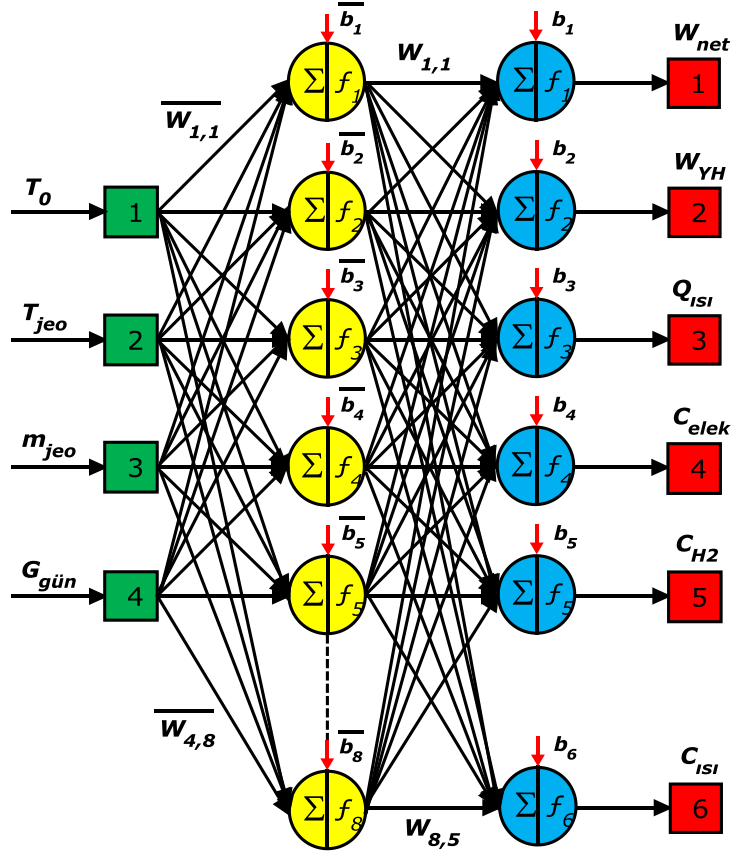
YSA yapısında bir gizli katmanda sekiz nöron vardır ve Tanjant Sigmoid transfer fonksiyonu, her bir nöronda transfer fonksiyonu olarak kullanılır. Çıkış katmanında ise Purelin transfer fonksiyonu kullanılır. YSA tabanlı model ile ilgili parametreler Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.15 Model 2 için YSA parametreleri.

YSA Parametreleri	Özellikler
Katmanların sayısı	3
Katmanlardaki nöronların sayısı	Giriş: 4 - Gizli: 8 - Çıkış: 4
Başlangıç ağırlıkları ve bias değerleri	Rastlantısal
Transfer fonksiyonu	Gizli: TanSig - Çıkış: Purelin
Öğrenme kuralı	Levenberg-Marquardt geri yayılım

3.4.3 YSA Yöntemi Kullanılarak Model 3 için Güç ve Maliyet Tahmini

İlk olarak, EES programı kullanılarak sistemin YSA tabanlı modellemesinde kullanılmak üzere 100X10 veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti eğitim için 80X10 ve test için 20X10 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA’da modellenen sistem 4 adet giriş ve 6 adet çıkıştan oluşmaktadır. Girişler çevre sıcaklığı, jeotermal kaynak sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve güneş ışınım şiddetidir. Çıkışlar sistemin güç üretim kapasitesi, yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi, ısıtma kapasitesi, yapılan ısıtma maliyeti, üretilen elektrik ve hidrojen maliyetidir. Bu işlemin ardından ileri beslemeli çok katmanlı 4 giriş ve 6 çıkışa sahip YSA yapısı MATLAB üzerinde oluşturulmuştur. Model 3 için 4-8-6 yapısının ileri beslemeli çok katmanlı YSA blok diyagramı Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 YSA tabanlı Model 3 için blok diyagramı.

YSA yapısında bir gizli katmanda sekiz nöron vardır ve Logaritmik Sigmoid transfer fonksiyonu, her bir nöronda transfer fonksiyonu olarak kullanılır. Çıkış katmanında ise Purelin transfer fonksiyonu kullanılır. YSA tabanlı model ile ilgili parametreler Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16 Model 3 için YSA parametreleri.

YSA Parametreleri	Özellikler
Katmanların sayısı	3
Katmanlardaki nöronların sayısı	Giriş: 4 - Gizli: 8 - Çıkış: 6
Başlangıç ağırlıkları ve bias değerleri	Rastlantısal
Transfer fonksiyonu	Gizli: LogSig - Çıkış: Purelin
Öğrenme kuralı	Levenberg-Marquardt geri yayılım

3.5 Modellerin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyonu

Modellerde kullanılan sistemlerin net güç üretimi, soğutma ve ısıtma kapasitesini maksimize etmek ve elektrik, hidrojen, soğutma ve ısıtma maliyetini minimize etmek için sırasıyla çevre sıcaklığı, jeotermal kaynak sıcaklığı, jeotermal akışkanın kütleli debisi ve güneş ışınım şiddeti tüm modeller için ortak karar parametreleri olarak seçilmiştir. Modellerin kendi içinde optimizasyonunun doğru ve başarılı bir şekilde yapılabilmesi adına, her model kendi içinde ayrı olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda her modelin kendisine ait olan karar parametrelerinin sınırları ve optimizasyon sonucunda elde edilen optimum değerleri, modellerin optimizasyon çalışmalarında verilmiştir. Tüm modellerde ortak olarak kullanılan karar parametrelerinin alt ve üst sınırları Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17 Karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.

Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	$12 \leq T_0 \leq 30$
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	$90 \leq T_{geo} \leq 150$
Jeotermal akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	$70 \leq \dot{m}_{geo} \leq 100$
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	$300 \leq G \leq 1000$

Genetik algoritma yöntemi ile çok amaçlı optimizasyon sürecinin her model için kullanılan ayar parametreleri Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18 Çok amaçlı optimizasyon sürecinin ayar parametreleri.

Popülasyonun büyüklüğü	120
Nesillerin sayısı	1000
Seçim süreci	Tournament
Pareto fraksiyonu	0.8

Sistemlerin optimizasyon işlemleri gerçekleştirilirken, daha önce YSA’da sistemlerin güç ve maliyet tahmini için kullanılan dizayn parametreleri referans alınmıştır. YSA’da giriş katmanı için kullanılan parametreler, genetik algoritma ile optimizasyon işleminde

karar parametreleri olarak kullanılmıştır. Aynı şekilde YSA'da çıkış katmanı için kullanılan parametreler, genetik algoritma yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon işleminde hedef fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

Buradan anlaşılacağı üzere YSA ile optimizasyon süreçlerinin birbirlerini tamamlayıcı bir bütün oldukları açık bir şekilde görülmektedir. Bu çalışmanın amacı sistemlerin MATLAB programı üzerinden YSA yöntemi ile modellemelerini gerçekleştirip, ardından genetik algoritma yöntemi ile üretilen elektriğin ve hidrojenin, yapılan ısıtma ve soğutmanın birim maliyetini minimize edecek aynı zamanda güç üretimi, ısıtma ve soğutma kapasitesini maksimize edecek optimum çalışma şartlarını elde etmektir.

3.5.1 Model 1 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon

Bu modelde jeotermal ve güneş enerji destekli güç santrallerinden elde edilen elektrik ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan elektrik, elektroliz ünitesine gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır. Şebekede elektriğe ihtiyaç duyulduğunda depolanmış olan hidrojen yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülür ve şebekeye verilir.

Model 1'de sistemin net güç çıkışı, yakıt hücresinde üretilen elektriğin miktarı, yakıt hücresinde üretilen elektriğin ve elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin birim maliyeti olmak üzere 4 adet amaç fonksiyonu vardır. Buradaki amaç net güç çıktısını ve üretilen elektriği maksimize etmek, üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetini minimize etmektir. Model 1'in optimizasyon çalışmalarında kullanılan karar parametrelerinin alt ve üst sınırları Çizelge 3.19'da verilmiştir.

Çizelge 3.19 Model 1 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları

Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	$12 \leq T_0 \leq 30$
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	$90 \leq T_{geo} \leq 150$
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	$70 \leq \dot{m}_{geo} \leq 100$
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	$300 \leq G \leq 1000$
Alçak basınç P_1 (kPa)	$100 \leq P_1 \leq 1000$
Yüksek basınç P_3 (kPa)	$1000 \leq P_3 \leq 4000$
TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	$0.1 \leq \dot{m}_{HTF} \leq 1$
TVP -1 akışkanın kolektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	$40 \leq T_{in} \leq 80$
Alçak basınç P_{10} (kPa)	$5 \leq P_{10} \leq 100$
Yüksek basınç P_{11} (kPa)	$1000 \leq P_{11} \leq 3000$
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	$5 \leq \Delta T_{pp} \leq 30$
Pompa izentropik verimi η_P	$0.70 \leq \eta_P \leq 0.90$
Türbin izentropik verimi η_T	$0.70 \leq \eta_T \leq 0.90$

3.5.2 Model 2 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon

Model 2’de jeotermal ve güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisi absorpsiyonlu soğutma sisteminde kullanılarak mahal soğutması yapılır. Çevrimden çıkan sıcak jeotermal akışkan ve ısı enerjisi, ORC çevriminde elektrik üretmek için kullanılır. Elde edilen elektrik ihtiyaca göre şebekeye verilir.

Model 2’de sistemin net güç çıkışı, absorpsiyonlu soğutma çevriminin soğutma kapasitesi, ORC çevriminde üretilen elektriğin ve absorpsiyonlu soğutma çevriminde yapılan soğutmanın birim maliyeti olmak üzere 4 adet amaç fonksiyonu vardır. Net güç çıkışını ve soğutma kapasitesini maksimize etmek, üretilen elektriğin ve yapılan

soğutmanın birim maliyetini minimize etmek için seçilen karar parametrelerinin alt ve üst sınırları Çizelge 3.20’de verilmiştir.

Çizelge 3.20 Model 2 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları

Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	$12 \leq T_0 \leq 30$
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	$90 \leq T_{geo} \leq 150$
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	$70 \leq \dot{m}_{geo} \leq 100$
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	$300 \leq G \leq 1000$
TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	$0.1 \leq \dot{m}_{HTF} \leq 1$
TVP -1 akışkanın kollektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	$40 \leq T_{in} \leq 80$
Çözelti konsantrasyonu x (Li-Br/kg çözelti)	$0.50 \leq x \leq 0.80$
Alçak basınç P_{12} (kPa)	$0.6 \leq P_{12} \leq 0.95$
Yüksek basınç P_{13} (kPa)	$4.5 \leq P_{13} \leq 10$
Evaporatör su giriş sıcaklığı T_{22} (°C)	$8 \leq T_{22} \leq 25$
Çözelti ısı değiştirici çıkış sıcaklığı T_{14} (°C)	$50 \leq T_{14} \leq 80$
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	$5 \leq \Delta T_{pp} \leq 30$
Pompa izentropik verimi η_p	$0.70 \leq \eta_p \leq 0.90$
Türbin izentropik verimi η_T	$0.70 \leq \eta_T \leq 0.90$
Alçak basınç P_1 (kPa)	$100 \leq P_1 \leq 1000$
Yüksek basınç P_3 (kPa)	$1000 \leq P_3 \leq 4000$

3.5.3 Model 3 İçin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon

Bu modelde jeotermal ve güneş enerjisinden elde edilen enerji ORC çevriminde elektrik üretmek için kullanılır. Üretilen elektrik güç kontrol ünitesine gönderilerek ihtiyaca göre şebekeye verilir. Şebekede ihtiyaç az olduğunda artan miktar elektroliz ünitesine

gönderilir ve hidrojen üretilerek depolanır. Şebekede elektriğe ihtiyaç duyulduğunda depolanmış olan hidrojen yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülür ve şebekeye verilir. Aynı zamanda ORC çevriminden atılan atık ısı, merkezi mahal ısıtmasında kullanılır. Model 3’de sistemin net güç çıkışı, yakıt hücresinde üretilen elektriğin miktarı, mahal ısıtmasında kullanılan ısı değiştiricisinin ısıtma kapasitesi, yakıt hücresinde üretilen elektriğin, elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin ve yapılan ısıtmanın birim maliyeti olmak üzere 6 adet amaç fonksiyonu vardır. Net güç çıkışını, üretilen elektriği ve ısı kapasitesini maksimize etmek, üretilen elektriğin, hidrojenin ve yapılan ısıtmanın birim maliyetini minimize etmek için seçilen karar parametrelerinin alt ve üst sınırları Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.21 Model 3 için karar parametrelerinin alt ve üst sınırları.

Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	$12 \leq T_0 \leq 30$
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	$90 \leq T_{geo} \leq 150$
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	$70 \leq \dot{m}_{geo} \leq 100$
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	$300 \leq G \leq 1000$
TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	$0.1 \leq \dot{m}_{HTF} \leq 1$
TVP -1 akışkanın kollektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	$40 \leq T_{in} \leq 80$
Alçak basınç P_1 (kPa)	$100 \leq P_1 \leq 1000$
Yüksek basınç P_3 (kPa)	$1000 \leq P_3 \leq 4000$
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	$5 \leq \Delta T_{pp} \leq 30$
Pompa izentropik verimi η_p	$0.70 \leq \eta_p \leq 0.90$
Türbin izentropik verimi η_T	$0.70 \leq \eta_T \leq 0.90$

4. BULGULAR

4.1 Modellerin Termodinamik Analiz Sonuçları

4.1.1 Model 1'in Termodinamik Analiz Sonuçları

4.1.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termodinamik Analiz Sonuçları

Yoğunlaştırılmış güneş enerji santralının her bir hali için enerji ve ekserji özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek ekserji oranları hesaplanmıştır. Parabolik kollektörde ısı transfer akışkanı olan Therminol VP-1 ve ORC çevriminde dolaşan Toluene akışkanın termodinamik özellikleri, bir bilgisayar paket yazılım programı olan EES aracılığıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Durum	Akışkan	Faz	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg•K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji oranı Ex (kW)
0	Hava	Ölü hal	25	100	298.6	5.695	0	0
0'	Toluene	Ölü hal	25	100	696.2	1.646	0	0
0''	Ther-VP1	Ölü hal	25	100	20	0.067	0	0
9	Toluene	Sıvı	45	10	123.2	0.351	1.054	4.935
10	Toluene	Sıvı	44	2000	123.1	0.358	3.263	15.27
11	Toluene	Buhar	191	2000	169.8	0.396	71.58	335.10
12	Toluene	Buhar	45	10	122.8	0.422	16.8	78.75
13	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	0	0
14	Su	Sıvı	35	100	146	0.503	0.686	18.91
15	Ther-VP1	Sıvı	191	100	318	0.8552	1688	315.8
16	Ther-VP1	Sıvı	60	100	77.94	0.2515	81.75	765

Bu kabuller ve tespit edilen optimum noktalar dikkate alınarak, parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali bilgisayar ortamında çalıştırıldığında, kollektörlere ısı girişi olan toplam güneş radyasyonu 1830 kW ve kollektörlerden yararlı ısı çıktısı 1372 kW olarak hesaplanmıştır. Bu çıktılar sonucunda parabolik kollektörün verimi %74.9 hesaplanmıştır. ORC çevrimine 15 halinde, 191°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debiye sahip sıvı fazında Therminol VP-1 ısı transfer akışkanı ile 315.8 kW ekserji girişi olmuştur. ORC çevriminde dolaşan Toluene akışkanın kütleli debisi 4.681 kg/s olarak hesaplanmıştır. Parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinde elde edilen net güç 207 kW olarak hesaplanmıştır. Bu güç çıkışı ORC çevriminde elde edilmiştir. ORC çevriminin enerji verimi %15.1 ve ekserji verimi %61.31 olarak hesaplanmıştır. Parabolik kollektörün ekserji verimi %19.81 olarak hesaplanmıştır. Tüm parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali dikkate alındığında enerji verimi %15.02 ve ekserji verimi %12.15 olarak hesaplanmıştır.

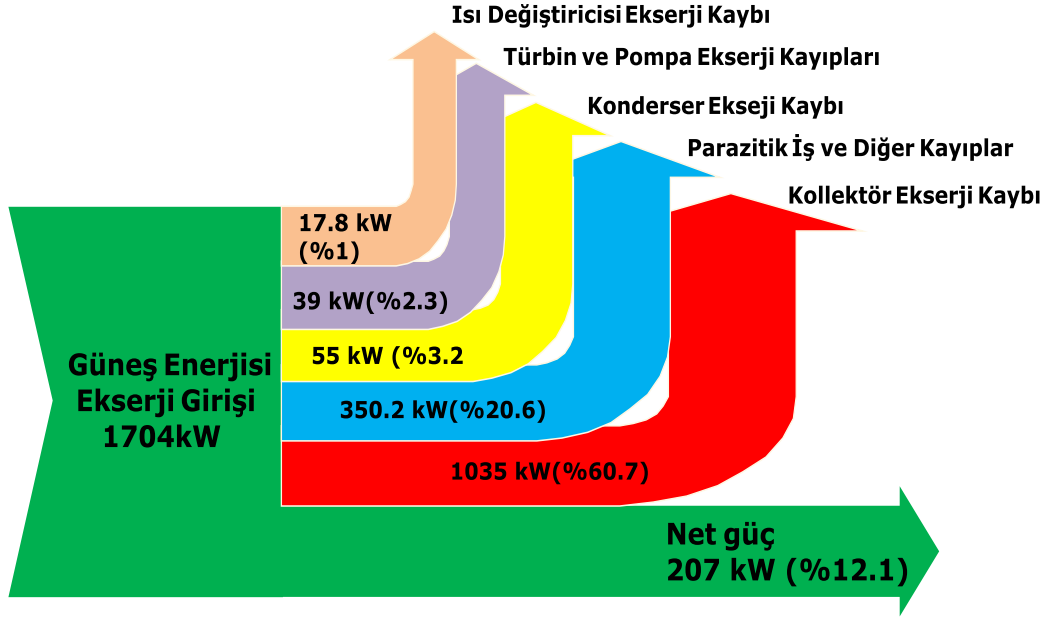
Model 1'in ekserji analizinde, sistem bileşenlerindeki elemanların toplam giren ekserji ve toplam çıkan ekserji değeri hesaplanmıştır. İç ve dış tersinmezlikler dikkate alınarak, "giren-çıkan" ekserji yaklaşımı ile sistem bileşenlerinin ekserji verimi hesaplanmıştır. Çizelge 4.2'de sistemin tüm alt bileşenlerinin ısı, iş ve ekserji değeri her bir bileşen için verilmiştir. Ek olarak sistem alt bileşenlerinin her birinin ekserji kaybı ve her bir sistem bileşeninin ekserji verimi de hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.

Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_{in}$ (kW)	$\dot{E}x_{out}$ (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)
Türbin	-	220	256.3	220	36.3
Pompa	-	13	13	10.3	2.7
Isı değiştiricisi	1090.6	-	337.6	319.8	17.8
Su soğutmalı kondenser	1151.9	-	73.8	18.9	54.9
Parabolik kollektör	1372	-	1704	669	1035

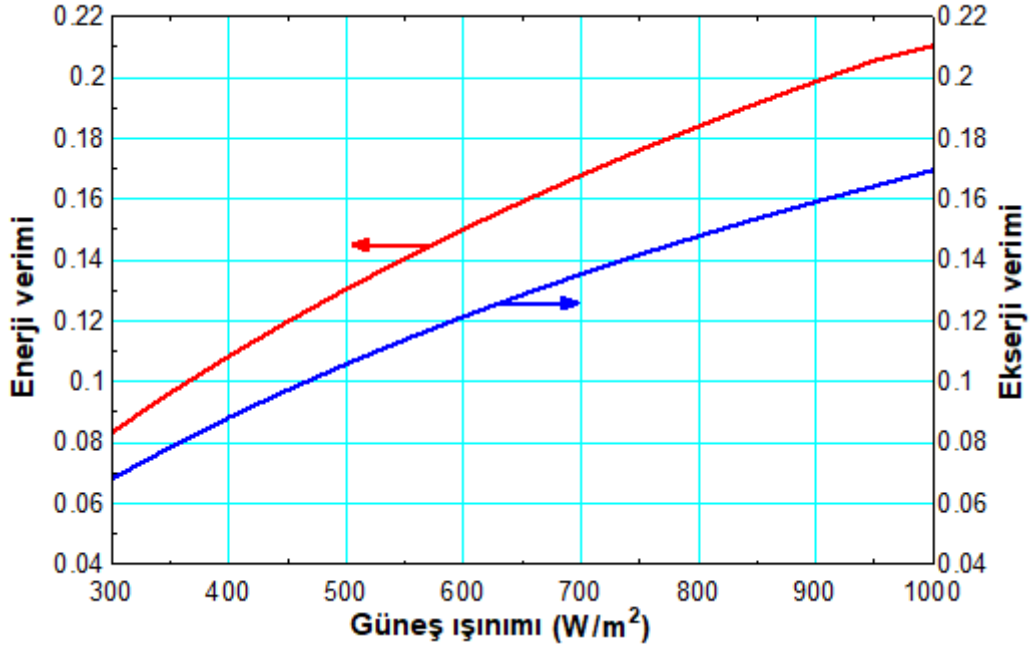
Tüm sistem ve sistem bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilerek ele alındığında, giren çıkan ekserji yaklaşımı ile ekserji verimi Çizelge 4.2'ye göre hesaplanabilir. Buradan anlaşıldığı üzere sistemin genel ekserji verimi %12 civarındadır. Sistem alt bileşenleri incelendiğinde ise, en düşük ekserji verimine sahip bileşen %19.81 ile parabolik kollektördür. En verimli sistem elemanı %94.72 ekserji verimi ile ısı değiştiricisidir. Bu değeri %85.82 ekserji verimi ile türbin, %79.56 ekserji verimi ile pompa ve %25.61 ekserji verimi ile su soğutmalı kondenser takip etmektedir. Parabolik kollektörden sonra en düşük ekserji verimine kondenser ünitesinin sahip olmasının sebebi, ORC çevriminde dolaşan akışkanın tekrar pompa ile geri basılıp sistemde kullanılabilmesi için fazla miktarda ısı enerjisini dışarı atmasıdır.

Şekil 4.1 parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralının ekserji akış diyagramını göstermektedir. Burada amaç en yüksek ekserji yok oluşunun hangi sistem elemanında gerçekleştiğini tespit etmektir. Bu kısımda sisteme ekserji girdisi, parabolik kollektörlere güneş enerjisi tarafından sağlanan ekserji girişidir. Sistemden ekserji çıkışı ise, üretilen elektrik enerjisidir. Bu giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile sistem ele alındığında, güneş enerjisi tarafından sisteme aktarılan ekserji girdisi 1704 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme aktarılan ekserji girdisinden, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıpları çıkarıldığında, elde edilen net ekserji 207 kW olarak elektrik enerjisidir. Ekserji akış diyagramından görüleceği üzere %60.7 oranla parabolik güneş kollektörü, toplam ekserji yok oluşunda en fazla paya sahiptir. Bu sonuç, iyileştirme çalışmalarının özellikle parabolik güneş kollektörü üzerinde yoğunlaşılması gerektiği anlamına gelmektedir. Alıcı borunun yutuculuğu ve ısıl geçirgenliği ile cam örtünün geçirgenliği ve yansıtıcılığı üzerinde yapılan iyileştirmeler sonucunda parabolik güneş kollektöründeki ekserji kaybı azaltılabilir. Parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralının ekserji verimi, oklar ile yukarı yönde gösterilen sistem alt bileşenlerinin ekserji kayıpları çıkartılarak hesaplandığında %12.1 olarak bulunmuştur.



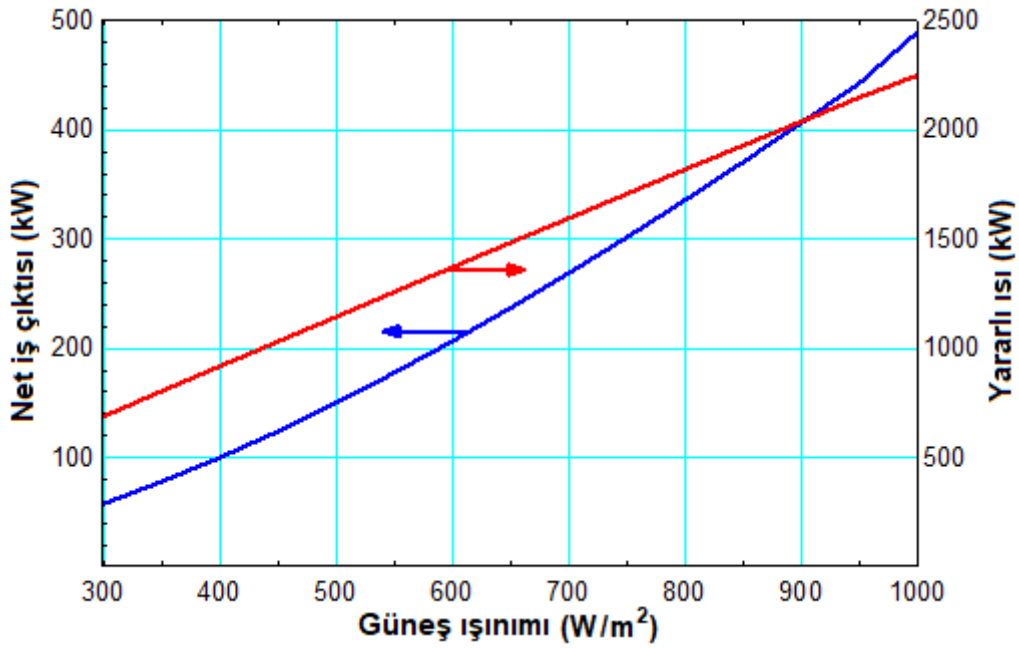
Şekil 4.1 Parabolik oluklu yoğunlaştırılmış güneş enerji santralinin ekserji akış diyagramı.

Aşağıda sisteme ait bazı parametrik çalışma sonuçlarını gösteren şekiller verilmiştir. Şekil 4.2’de güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin azalması ile doğru orantılı bir şekilde sistemin enerji ve ekserji veriminin düştüğü, güneş ışınım şiddetinin artması ile sistemin enerji ve ekserji veriminin yükseldiği görülmektedir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 ile minimum olduğu durumda, sistemin enerji veriminin %8.3, ekserji veriminin ise %6.8 olduğu gözlemlenmiştir. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m^2 ile maksimum olduğu durumda, sistemin enerji veriminin %21, ekserji veriminin ise %16.9 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.

Şekil 4.3’de güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, sistemin net iş çıktısında ve yararlı enerjisinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin azalması ile net iş çıktısının ve yararlı enerjinin düştüğü, güneş ışınım şiddetinin artması ile doğru orantılı bir şekilde net iş çıktısının ve yararlı enerjinin yükseldiği görülmektedir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m² ile minimum olduğu durumda, net iş çıktısının 58 kW, yararlı enerjinin ise 690 kW olduğu gözlemlenmiştir. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m² ile maksimum olduğu durumda, net iş çıktısının 490 kW, yararlı enerjinin ise 2250 kW olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve yararlı enerjinin değişimi.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, sistem parametrelerinden daha iyi sonuçlar elde edebilmemiz için, güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmamız gerekmektedir. Günümüzde parabolik güneş kolektör sistemleri ile ilgili deneysel ve teorik araştırmalar devam etmektedir. Parabolik güneş kolektör sistemlerinde yapılacak olan, daha iyi bir dizayn ve daha yüksek enerji toplama kapasitesi gibi çalışmalar, bu tip sistemlerin enerji üretimi ve verimliliği üzerine oldukça katkı sağlayacaktır.

4.1.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termodinamik Analiz Sonuçları

Binary jeotermal enerji santralinin her bir hali için enerji ve ekserji özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek ekserji oranları hesaplanmıştır. Isı kaynağı olan jeotermal akışkan ve ORC çevriminde dolaşan R134a akışkanın termodinamik özellikleri, bir bilgisayar paket yazılım programı olan EES aracılığıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Durum	Akışkan	Faz	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg·K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji oranı Ex (kW)
0	Hava	Ölü hal	25	100	298.6	5.695	0	0
0'	R134a	Ölü hal	25	100	276.4	1.105	0	0
0''	Jeotermal	Ölü hal	25	100	104.8	0.3672	0	0
0'''	Su	Ölü hal	25	100	104.2	0.365	0	0
1	R134a	Sıvı	12.5	450	68.8	0.2647	34.45	3156
2	R134a	Sıvı	13.3	2000	70.27	0.2654	35.69	3269
3	R134a	Buhar	123	2000	349.1	1.09	80.06	7333
4	R134a	Buhar	73.3	450	315	1.108	40.95	3751
5	Jeotermal	Sıvı	130	-	537	1.613	80	6800
6	Jeotermal	Sıvı	56.5	-	236.9	0.7881	13.66	1161
7	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	0	0
8	Su	Sıvı	35	100	146	0.503	0.686	399

Yapılan termodinamik analiz sonucunda, 130°C sıcaklığa ve 85 kg/s kütleli debiye sahip sıvı ağırlıklı jeotermal akışkanı ile binary güç çevrimine 41,675 kW enerji, 25,542 kW ısı ve 6800 kW ekserji girişi olmuştur. Binary güç çevriminde ikincil akışkan olan R134a akışkanın kütleli debisi 91.6 kg/s olarak hesaplanmıştır. Binary jeotermal enerji santralinden elde edilen net iş 2693 kW olarak hesaplanmıştır. Binary güç çevriminin enerji verimi %10.5 ve ekserji verimi %66.2 olarak hesaplanmıştır. Tüm sistem dikkate alındığında ise enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla %6.5 ve %39.6 hesaplanmıştır.

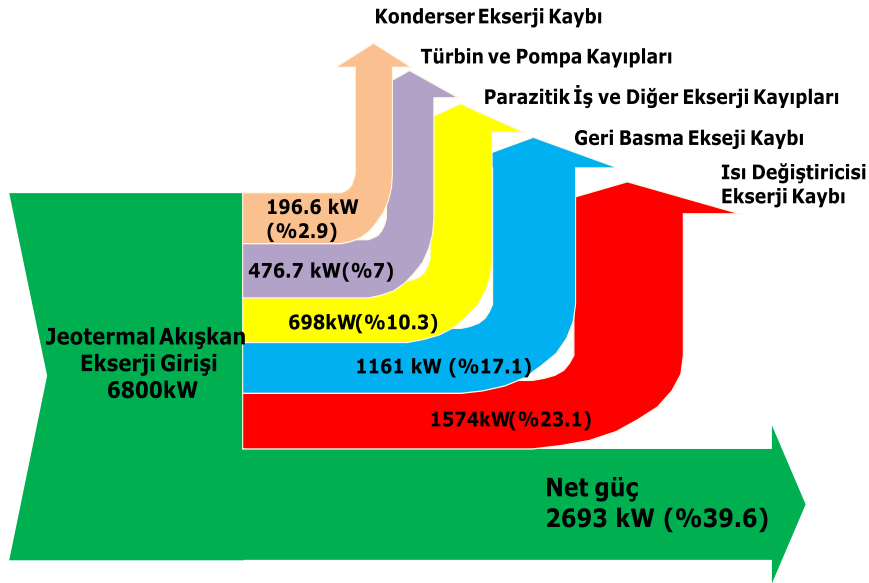
Çizelge 4.4'de sistemin tüm alt bileşenlerinin ısı, iş ve ekserji değerleri her bir bileşen için verilmiştir. Ayrıca sistem alt bileşenlerinin her birinin ekserji kayıpları ve ekserji verimleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4 Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.

Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_{in}$ (kW)	$\dot{E}x_{out}$ (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)
Türbin	-	3125	3582	3125	457
Pompa	-	133.4	133.4	113	20.4
Isı değiştiricisi	18,072.6	-	5639	4064	1575
Su soğutmalı kondenser	22,551.9	-	595	399	196

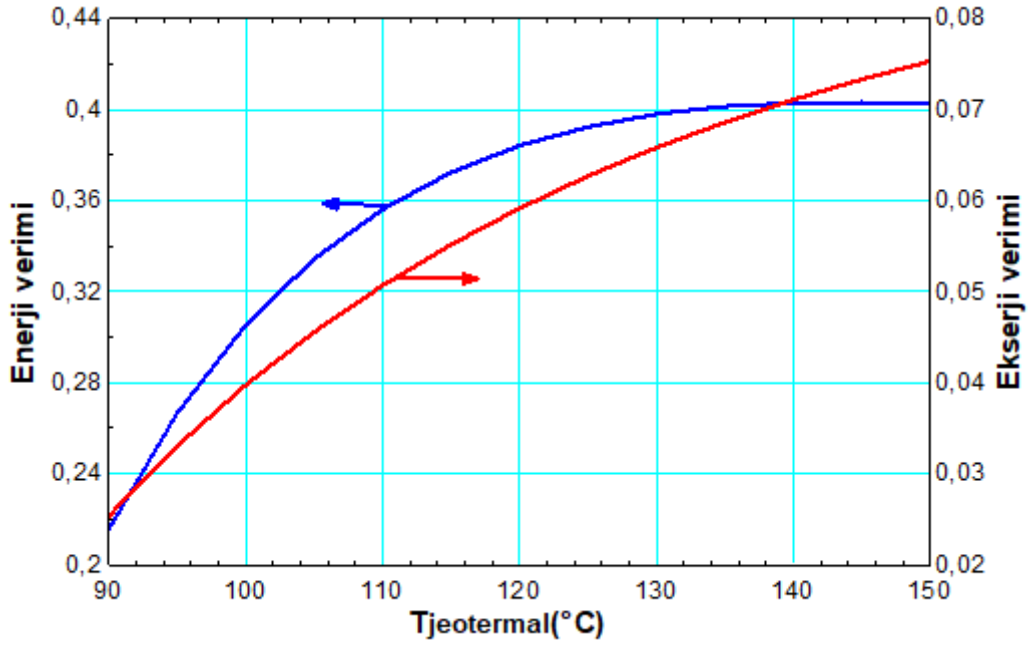
Tüm sistem ve sistem bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilerek ele alındığında, ekserji verimi Çizelge 4.4'e göre hesaplanabilir. Sistem alt bileşenleri incelendiğinde, en düşük ekserji verimine sahip bileşen %67 ile su soğutmalı kondenserdir. En düşük ekserji verimine kondenserin sahip olmasının nedeni, çevrimde dolaşan akışkanın sistemde tekrar kullanılabilmesi için fazla miktarda ısı enerjisini dışarı atmasıdır. En yüksek ekserji verimine sahip sistem elemanı ise %87.2 ile türbindir. Bu değeri %84.9 ekserji verimi ile pompa ve %72 ekserji verimi ile ısı değiştiricisi takip etmektedir.

Şekil 4.5 binary jeotermal enerji santralinin ekserji akış diyagramını göstermektedir. Burada sisteme ekserji girdisi jeotermal akışkandan sağlanan ekserji, sistemden ekserji çıktısı ise üretilen elektrik enerjisidir. Bu giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile sistem ele alındığında, jeotermal akışkan tarafından sisteme aktarılan ekserji girdisi 6800 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme aktarılan ekserji girdisinden, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıpları çıkarıldığında, elde edilen net ekserji 2693 kW olarak elektrik enerjisidir. Aşağıdaki ekserji akış diyagramından da anlaşılacağı üzere sisteme giren ekserjinin %60.4'ü kaybolmaktadır. Geriye kalan ekserjinin %39.4'lük kısmı ise işe dönüştürülebilmektedir.



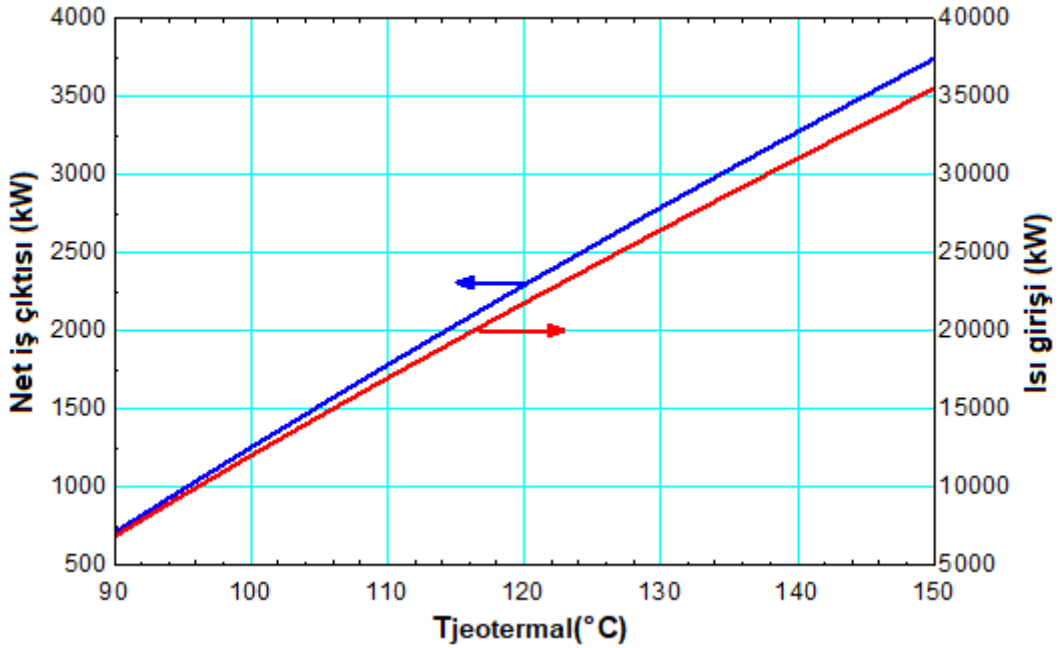
Şekil 4.4 Binary jeotermal santralinin ekserji akış diyagramı.

Aşağıda sisteme ait birtakım parametrik çalışma sonuçlarını gösteren şekiller verilmiştir. Şekil 4.5’de jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça, enerji verimi de lineer olarak yükselmektedir. Jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça ekserji verimi önce lineer sonrasında logaritmik bir yükseliş göstermiştir ve belli bir sıcaklıktan sonra ekserji veriminin yükselişi durmuştur. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda, sistemin enerji veriminin %2.5, ekserji veriminin ise %21.5 olduğu gözlemlenmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda, sistemin enerji veriminin %7.5, ekserji veriminin ise %40 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.

Şekil 4.6'da jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin net iş çıktısında ve sisteme giren ısı enerjisinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığının artması ile birlikte, net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.

4.1.1.3 Tüm Sisteminin Termodinamik Analiz Sonuçları

Daha önceki bölümlerde jeotermal ve güneş enerjisi santrali olmak üzere iki kısımda ayrı olarak incelenen sistem, bu bölümde tüm sistem bileşenleri dikkate alınarak Model 1'in genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Modelin her bir hali için enerji ve ekserji özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Verilen termodinamik değerler sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek, ekserji oranları hesaplanmıştır ve tabloda buna göre verilmiştir.

Çizelge 4.5 Modelin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Durum	Akışkan	Faz	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg•K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji oranı Ex (kW)
0	Hava	Ölü hal	25	100	298.6	5.695	0	0
0'	R134a	Ölü hal	25	100	276.4	1.105	0	0
0''	Jeotermal	Ölü hal	25	100	104.8	0.3672	0	0
0'''	Toluene	Ölü hal	25	100	696.2	1.646	0	0
0''''	Ther-VP1	Ölü hal	25	100	20	0.067	0	0
1	R134a	Sıvı	12.5	450	68.8	0.2647	34.45	3156
2	R134a	Sıvı	13.3	2000	70.27	0.2654	35.69	3269
3	R134a	Buhar	123	2000	349.1	1.09	80.06	7333
4	R134a	Buhar	73.3	450	315	1.108	40.95	3751
5	Jeotermal	Sıvı	130	-	537	1.613	80	6800
6	Jeotermal	Sıvı	56.5	-	236.9	0.7881	13.66	1161
7	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	0	0
8	Su	Sıvı	35	100	146	0.503	0.686	399
9	Toluene	Sıvı	45	10	123.2	0.351	1.054	4.935
10	Toluene	Sıvı	44	2000	123.1	0.358	3.263	15.27
11	Toluene	Buhar	191	2000	169.8	0.396	71.58	335.10

Çizelge 4.5 (Devam)

12	Toluene	Buhar	45	10	122.8	0.422	16.8	78.75
13	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	0	0
14	Su	Sıvı	35	100	146	0.503	0.686	18.91
15	Ther-VP1	Sıvı	191	100	318	0.8552	1688	315.8
16	Ther-VP1	Sıvı	61	100	77.94	0.2515	81.75	765
17	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	900	1.384
18	Hidrojen	Gaz	25	100	-	64.81	236100	2163
19	Oksijen	Gaz	25	100	-	6.41	3970	1.146

Çizelge 4.6’da her bir sistemin enerji ve ekserji verimleri gösterilmiştir.

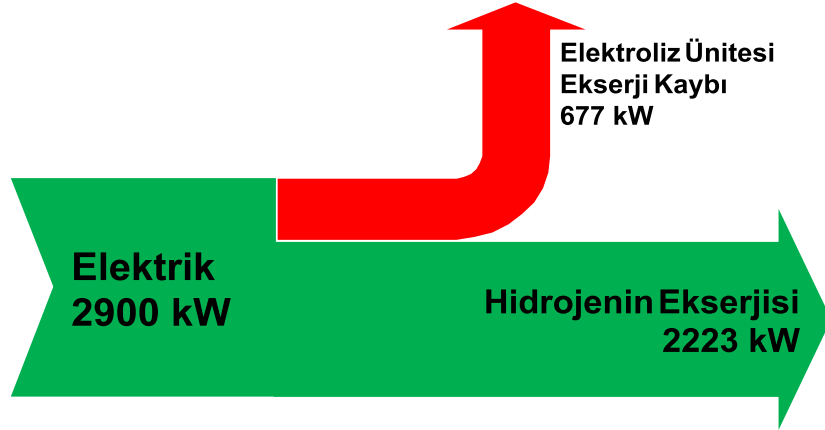
Çizelge 4.6 Model 1’in enerji ve ekserji verimi.

Sistem	$\eta_{\text{enerji}} (\%)$	$\epsilon_{\text{ekserji}} (\%)$
Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santrali	15.05	12.15
Binary Jeotermal Enerji Santrali	6.50	39.60
Model 1 geneli	7.50	23.50

Yapılan termodinamik analiz sonucunda, sisteme toplam 43,505 kW enerji, 26,922 kW ısı enerjisi ve 8504 kW ekserji girişi olmuştur. Sistemden elde edilen toplam net iş 2000 kW olarak hesaplanmıştır. Elektroliz işlemi sonucunda üretilen hidrojenin kütleli debisi 0.0185 kg/s olarak hesaplanmıştır. Sistemin genel enerji verimi %7.5 ve genel ekserji verimi %23.5 olarak hesaplanmıştır.

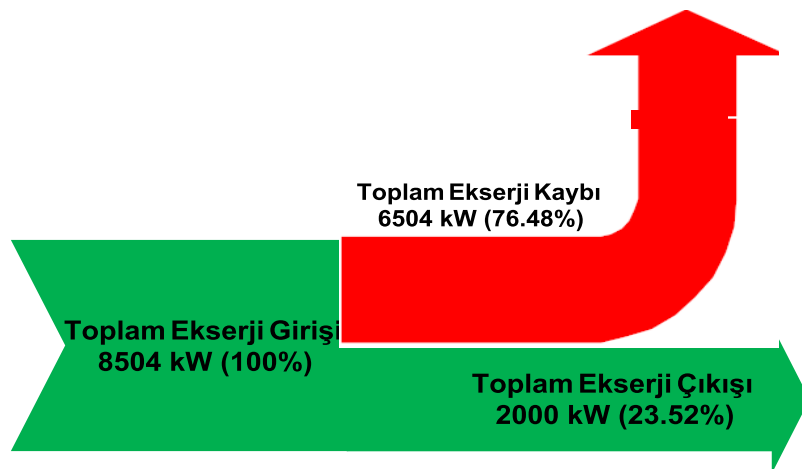
Şekil 4.7’de elektroliz ünitesine ait ekserji akış diyagramı gösterilmektedir. Jeotermal enerji ve güneş enerjisi santrallerinde üretilen toplam 2900 kW net güç elektroliz ünitesine gönderilmektedir. Üretilen bu toplam net güç, elektroliz ünitesi için net ekserji girişidir. Elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin net ekserjisi 2223 kW olarak

hesaplanmıştır. Burada elektroliz ünitesinin ekserji verimi %76.6 olarak hesaplanmıştır. Elektroliz ünitesinde gerçekleşen ekserji kaybı ise 677 kW olarak hesaplanmıştır.



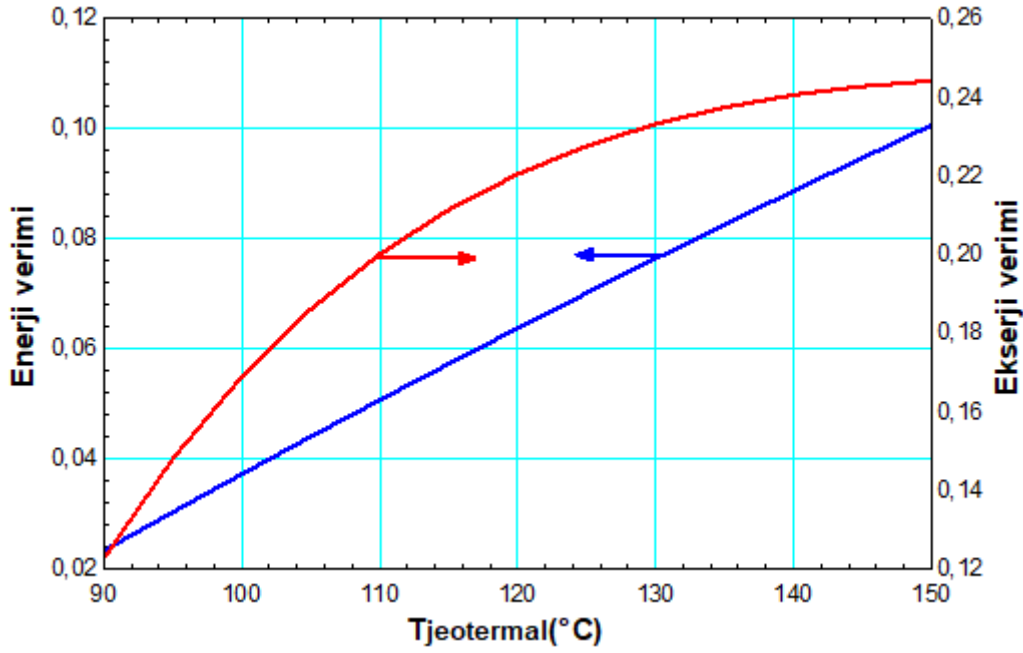
Şekil 4.7 Elektroliz ünitesinin ekserji akış diyagramı.

Şekil 4.8’de Model 1 geneli için, yakıt ürün yaklaşımı ile sisteme giren toplam ekserji, sistemden çıkan toplam ekseji ve sistemdeki toplam ekserji kaybı gösterilmiştir. Bu ekserji akış diyagramı, dış tersinmezliklerin ihmal edildiği sistem bileşenleri bazında ekserji analizini göstermektedir. Sisteme giren net ekserji 8504 kW, sistemden çıkan net ekserji ise 2000 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde meydana gelen toplam ekserji kaybı 6504 kW hesaplanmıştır. Sisteme giren ekserjinin %76.48’lik kısmı sistem bileşenlerde kayıp olmuştur. Sistemin genel ekserji verimi %23.52 olarak hesaplanmıştır.



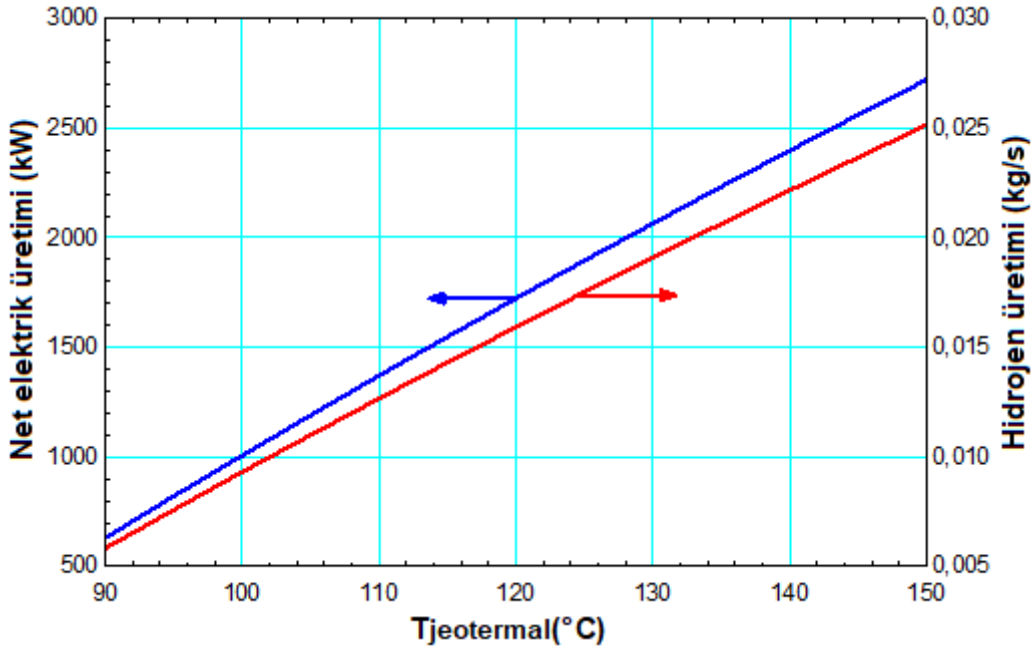
Şekil 4.8 Model 1 geneli için ekserji akış diyagramı.

Aşağıda Model 1'e ait parametrik çalışma sonuçlarını gösteren şekiller verilmiştir. Şekil 4.9'da jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça, enerji verimi de lineer olarak yükselmektedir. Jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça, ekserji veriminde logaritmik bir yükseliş meydana gelmiştir.



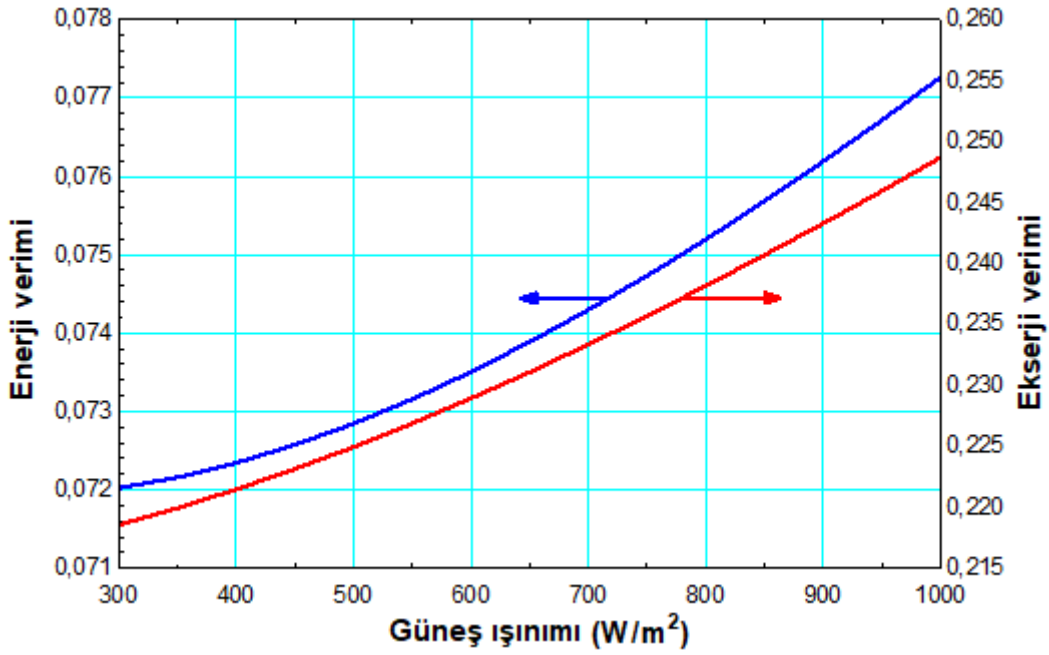
Şekil 4.9 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.

Şekil 4.10'da jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin net elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça, sistemin net elektrik ve hidrojen üretiminde lineer bir şekilde yükseliş meydana gelmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda, net elektrik üretimi 631 kW ve hidrojen üretimi 0.0058 kg/s olmuştur. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda, net elektrik üretiminin 2721 kW, hidrojen üretiminin ise 0.0251 kg/s olduğu gözlemlenmiştir.



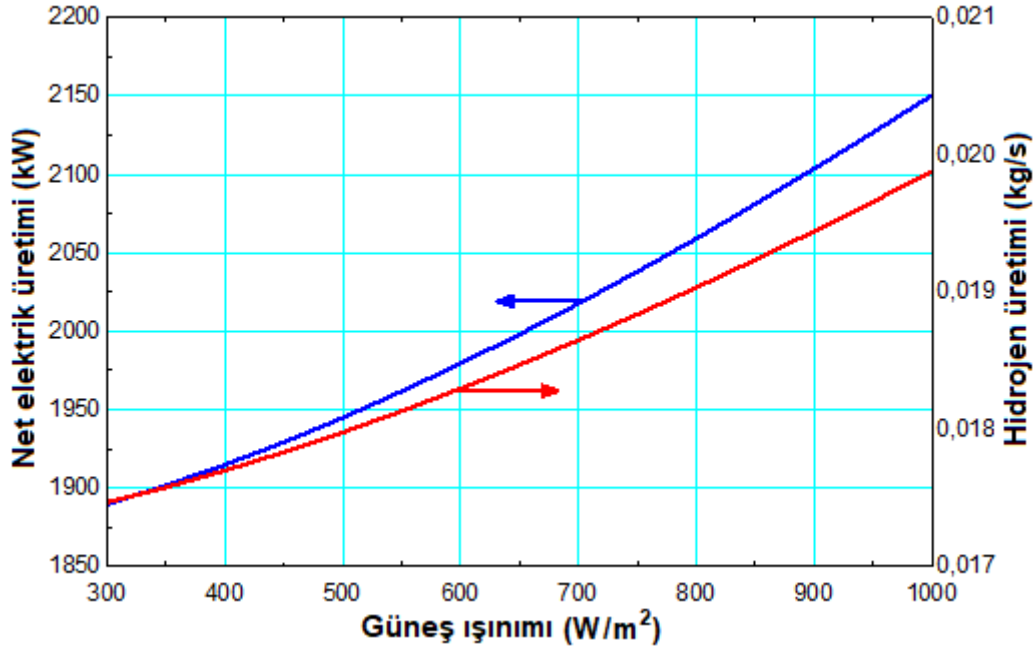
Şekil 4.10 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.

Şekil 4.11’de güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin artması ile sistemin enerji ve ekserji veriminin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.11 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi.

Şekil 4.12 incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin artması ile sistemin net elektrik ve hidrojen üretiminde artış olduğu görülmektedir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 olduğu durumda elektrik üretimi 1890 kW , 1000 W/m^2 olduğu durumda ise elektrik üretimi 2150 kW olmaktadır. Hidrojen üretimi ise, $0,0174$ ile $0,0198 \text{ kg/s}$ aralığında değişmektedir.



Şekil 4.12 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.

4.1.2 Model 2'nin Termodinamik Analiz Sonuçları

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji sisteminin her bir hali için enerji ve ekserji özellikleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek ekserji oranları hesaplanmıştır. Parabolik kolektörde ısı transfer akışkanı olan Therminol VP-1 akışkanının, ORC çevriminde R134a akışkanının, jeotermal akışkanın ve absorpsiyonlu soğutma çevriminde dolaşan LiBr- H_2O akışkan çiftinin termodinamik özellikleri, bir bilgisayar paket yazılım programı olan EES aracılığıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Durum	Akışkan	Faz	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg·K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji oranı Ex (kW)
0	Hava	Ölü hal	25	100	298.6	5.695	0	0
0'	Jeotermal	Ölü hal	25	100	104.8	0.3672	0	0
0''	Ther-VP1	Ölü hal	25	100	20	0.067	0	0
0'''	Zayıf Çözelti	Ölü hal	25	100	60.88	0.1666	0	0
0''''	Zengin Çözelti	Ölü hal	25	100	141.8	0.1271	0	0
0'''''	R134a	Ölü hal	25	100	276.4	1.105	0	0
0''''''	Su	Ölü hal	25	100	104.2	0.365	0	0
1	R134a	Sıvı	26.7	700	88.8	0.3323	43.01	3871
2	R134a	Sıvı	28.22	3000	91.07	0.3334	44.93	4043
3	R134a	Buhar	118.2	3000	330.8	1.017	80.86	7278
4	R134a	Buhar	62.6	700	301	1.033	46.3	4167
5	Su	Sıvı	25	100	104.9	0.3672	0	0
6	Su	Sıvı	30	100	125.8	0.4367	0.1838	167.9
7	Jeotermal	Sıvı	130	270	546.4	1.635	63.77	5420
8	Jeotermal	Sıvı	120	198.7	503.8	1.528	53	4505
9	Jeotermal	Sıvı	60	20	251.2	0.8313	7.962	676.8
10	Ther-VP1	Sıvı	145	100	227.8	0.6507	34.15	27.32
11	Ther-VP1	Sıvı	135	100	209	0.6051	28.91	23.13
12	Zayıf Çözelti	Sıvı	30	0.8	71.16	0.2009	0.02855	0.1619
13	Zayıf Çözelti	Sıvı	30	0.8	71.16	0.2009	0.03436	0.1948
14	Zayıf Çözelti	Sıvı	75	10	165.9	0.4921	7.968	45.18
15	Zengin Çözelti	Sıvı	125	10	316.9	0.6333	24.21	108.9
16	Zengin Çözelti	Sıvı	57.1	10	197.4	0.3044	2.786	12.53
17	Zengin Çözelti	Sıvı	57.1	0.8	197.4	0.3044	2.781	12.51

Çizelge 4.7 (Devam)

18	Su	Buhar	105	10	2683	7.295	513.9	603.2
19	Su	Sıvı	45.8	10	191.8	0.6492	2.852	3.347
20	Su	Sıvı	4	0.8	191.8	0.6925	-10.05	-11.79
21	Su	Buhar	4	0.8	2508	9.05	-184.3	-216.3
22	Su	Sıvı	20	100	84	0.2965	0.1667	10.82
23	Su	Sıvı	10	100	42.12	0.1511	1.603	104.1
24	Su	Sıvı	20	100	84	0.2965	0.1667	10.82
25	Hava	Gaz	34	100	307.4	6.892	0.1385	28.78
26	Hava	Gaz	21	100	294.4	6.849	0.0252	5.237
27	Ther-VP1	Sıvı	60	100	76.54	0.2473	3.13	2.504
28	Ther-VP1	Sıvı	60	100	76.54	0.2473	3.13	2.504

Yapılan termodinamik analiz sonucunda, jeotermal akışkan ve ısı transfer akışkanından (Therminol VP-1) kojenere enerji sistemine 25,261 kW ısı ve 5578 kW ekserji girişi olmuştur. Absorpsiyonlu soğutma sistemine jeotermal akışkan 7 halinde 130°C sıcaklık ve 85 kg/s kütleli debi ve parabolik oluk kollektörden gelen ısı transfer akışkanını 10 halinde 145°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debi ile ısı kaynağı olarak giriş yapmıştır. Bu termodinamik özellikler dikkate alındığında ısıtıcıya aktarılan ısı (\dot{Q}_{gen}) 3634 kW olarak hesaplanmıştır. Jeotermal akışkanın sistemi terk ettiği sıcaklık 8 halinde 120°C, ısı transfer akışkanının sistemi terk ettiği sıcaklık 11 halinde 135°C'dir. Bu sıcaklık değerleri, çözeltiliye en yüksek oranda ısı aktarma dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çünkü ısıtıcı sıcaklığı belli bir dereceye kadar makul olmaktadır. Bu vesile ile ısıtıcı sıcaklığı 125°C'ye kadar çıkarılabilmektedir. Bu etki ile sistemde çevrilen saf su kısılma vanasında 20 halinde 4°C'ye kadar soğutulabilmektedir. Daha sonra saf su 20 halinde evaporatörden geçerken ortamdan ısı çekerek 21 halinde yine 4°C'de yoğunlaşmaktadır. Burada ortamdan çekilen ısı (\dot{Q}_E) 2720 kW olarak hesaplanmıştır. Evaporatörden çıktıktan sonra saf su absorbere girer ve burada LiBr ile çözelti oluşturur. Bu reaksiyon

ekzotermik olup açığa ısı çıkmaktadır. Absorber ısısı (\dot{Q}_A) dediğimiz bu değer 3428 kW olarak hesaplanmıştır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin gerçek performans katsayı (COP) değeri 0.748 ve ekserji verimi %22.5 olarak hesaplanmıştır.

Elektrik enerjisinin üretildiği ORC çevrimine, absorpsiyonlu soğutma sisteminden gelen jeotermal akışkan ve ısı transfer akışkanı ile 21,579 kW ısı ve 4505 kW ekserji girişi olmuştur. ORC çevriminde ikincil akışkan olan R134a akışkanın kütleli debisi 90 kg/s olarak hesaplanmıştır. ORC çevriminden elde edilen net iş 2235 kW olarak hesaplanmıştır. ORC çevriminin enerji verimi %10.3 ve ekserji verimi %49.6 olarak hesaplanmıştır.

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji sisteminin genel enerji verimi %19.6 ve genel ekserji verimi %43.7 hesaplanmıştır. Çizelge 4.8’de her bir sistemin enerji ve ekserji verimi ile COP değeri gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Model 2’ye ait enerji ve ekserji verimi ile COP değeri.

Sistem	COP	η_{enerji} (%)	$\epsilon_{\text{ekserji}}$ (%)
Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi	0.748	-	22.5
ORC Güç Santrali	-	10.3	49.6
Model 2 geneli	-	19.6	43.7

Çizelge 4.9’da sistemin tüm alt bileşenlerinin ısı, iş ve ekserji değerleri her bir bileşen için verilmiştir. Ayrıca sistem alt bileşenlerinin her birinin ekserji kayıpları ve ekserji verimi hesaplanmıştır.

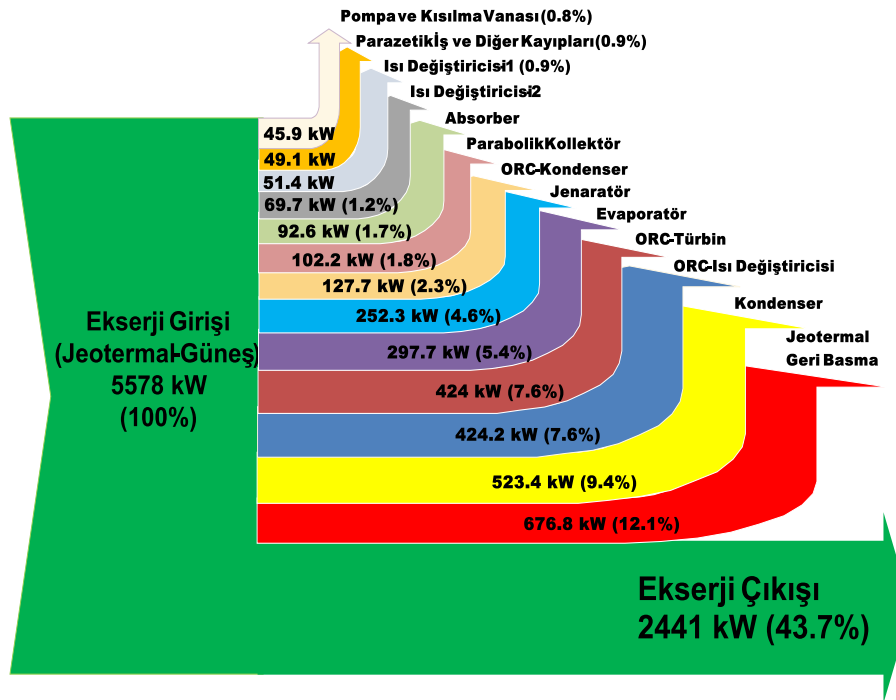
Çizelge 4.9 Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.

Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_{in}$ (kW)	$\dot{E}x_{out}$ (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)	\mathcal{E} (%)
Absorber	3428	-	203.9	111.3	92.6	54.7
Pompa	-	0.03866	0.03866	0.03296	0.005701	85.3
Kısılma vanası -1	-	-	12.53	12.51	0.02	99.8
Isı değiştiricisi - 1	1828	-	96.35	45	51.35	46.7
Jeneratör	3634	-	5492.5	5240.2	252.3	95.4
Kondenser	2924	-	599.8	76.4	523.4	12.7
Kısılma vanası -2	-	-	3.347	-11.79	15.13	28.3
Evaporatör	2720	-	204.5	-93.24	297.7	45.6
Isı değiştiricisi - 2	2720	-	93.24	23.55	69.69	25.2
ORC-Türbin	-	2687	3111	2687	424	86.3
ORC-Pompa	-	202.9	202.9	172.16	30.74	84.8
ORC-Isı değiştiricisi	21,579	-	3848.63	3424.43	424.2	84
ORC- Kondenser	19,096	-	295.6	167.9	127.7	56.8
Parabolik Kollektör	121.9	-	157.7	55.5	102.2	15.7

Tüm sistem ve sistem bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilerek ele alındığında, ekserji verimi Çizelge 4.9'a göre hesaplanabilir. Sistem alt bileşenleri incelendiğinde, en düşük ekserji verimine sahip bileşen %12.7 absorpsiyonlu soğutma sistemindeki su soğutmalı kondenserdir. En düşük ekserji verimine kondenserin sahip olmasının nedeni, çevrimde dolaşan akışkanın sistemde tekrar kullanılabilmesi için fazla miktarda ısı enerjisini dışarı atmasıdır. En yüksek ekserji verimine sahip sistem elemanı ise %95.4 absorpsiyonlu soğutma sisteminde yer alan ile jeneratör ünitesidir.

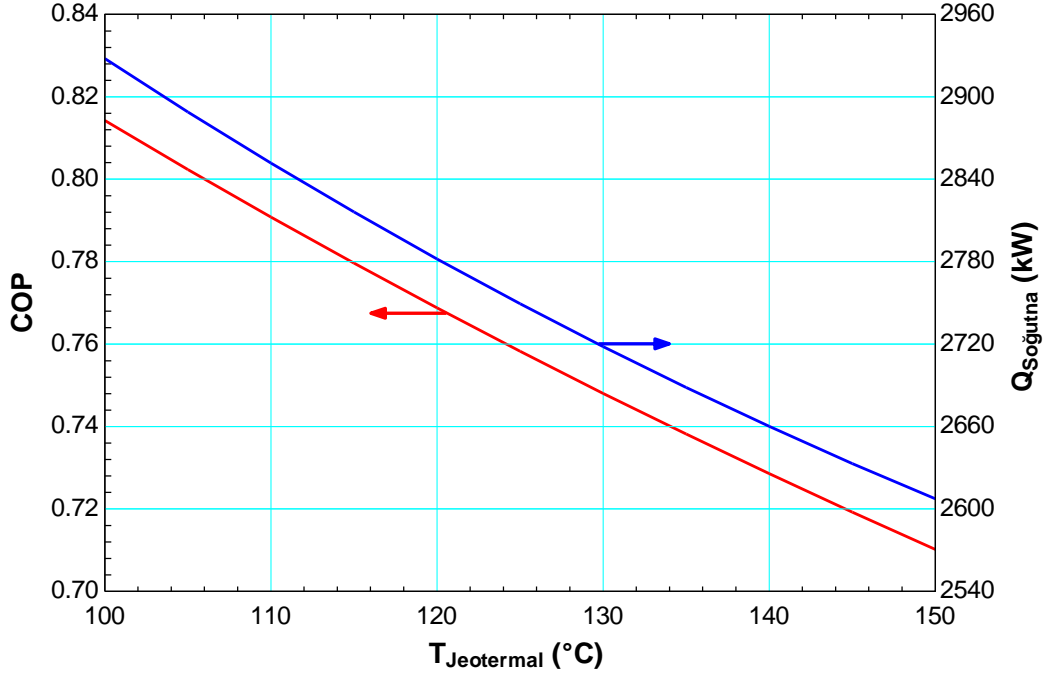
Aşağıda Model 2'ye ait ekserji akış diyagramı gösterilmiştir. Sisteme ekserji girdisi, yer altından basılan jeotermal akışkan ve parabolik kollektörlere güneş enerjisi tarafından sağlanan ekserji girişidir. Sistemden ekserji çıktısı ise, üretilen elektrik enerjisi ve

soğutma kapasitesinin ekserjisidir. Giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile sistem ele alındığında, jeotermal ve ısı transfer akışkanı tarafından sisteme aktarılan ekserji girdisi 5578 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme aktarılan ekserji girdisinden, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıpları çıkarıldığında, elde edilen net ekserji 2441 kW'dır. Aşağıdaki ekserji akış diyagramından da anlaşılacağı üzere sisteme giren ekserjinin %56.3'ü kaybolmaktadır. Geriye kalan ekserjinin %43.7'lik kısmı ise işe ve soğutmaya dönüştürülebilmektedir.



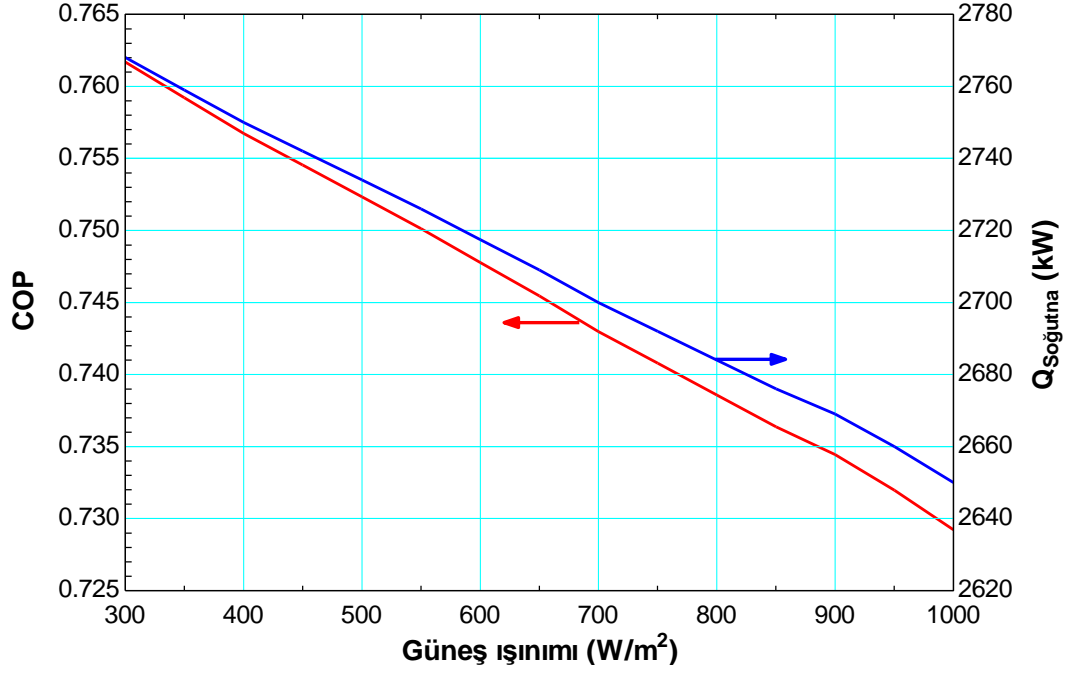
Şekil 4.13 Model 2 geneli için ekserji akış diyagramı.

Aşağıda Model 2'ye ait parametrik çalışma sonuçlarını gösteren şekiller verilmiştir. Şekil 4.14'de jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, absorpsiyonlu soğutma çevriminin performans katsayısında (COP) ve soğutma kapasitesinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla birlikte absorpsiyonlu soğutma çevriminin COP değerinin ve soğutma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni daha yüksek bir jeotermal kaynak sıcaklığında, absorpsiyonlu soğutma çevriminin daha düşük oranda jeotermal enerjiyi kullanabilmesidir.



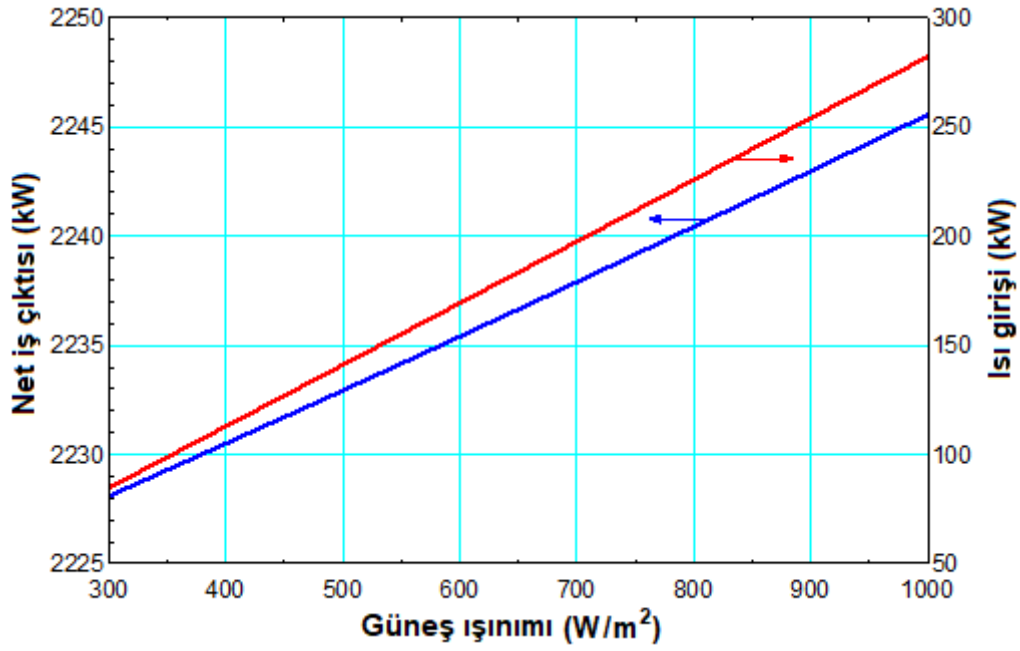
Şekil 4.14 Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak COP değeri ve soğutma kapasitesi.

Şekil 4.15'de güneş ışınımının 300 ile 1000 W/m² arasında değişmesiyle absorpsiyonlu soğutma çevriminin performans katsayısı (COP) değeri ve soğutma kapasitesinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde güneş ışınım şiddetinin yükselmesiyle daha düşük seviyede güneş enerjisi kullanılabildiği için absorpsiyonlu soğutma çevriminin COP değeri ve soğutma kapasitesi azalmaktadır.



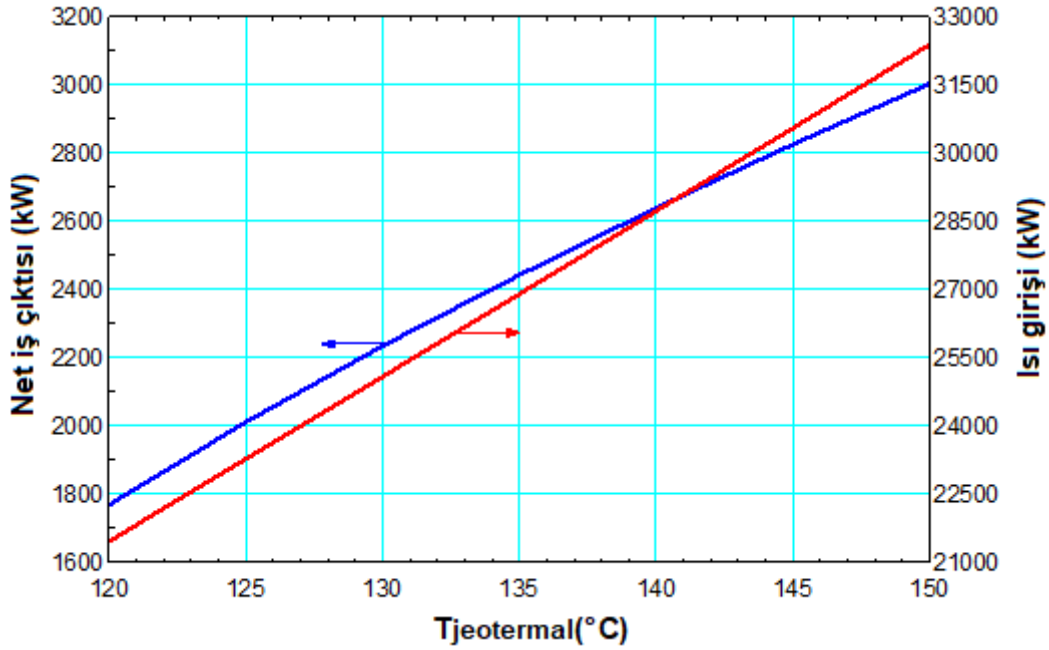
Şekil 4.15 Güneş ışınımına bağlı olarak COP değeri ve soğutma kapasitesi.

Şekil 4.16’da güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, sistemin net iş çıktısında ve sisteme giren ısı enerjisinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin azalması ile net iş çıktısının ve ısı enerjisinin düştüğü, güneş ışınım şiddetinin artması ile doğru orantılı bir şekilde net iş çıktısının ve ısı enerjisinin yükseldiği görülmektedir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 ile minimum olduğu durumda net iş çıktısının 2228 kW , ısı enerjisinin ise 84.66 kW olduğu gözlemlenmiştir. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m^2 ile maksimum olduğu durumda net iş çıktısının 2246 kW , ısı enerjisinin ise 282.2 kW olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin değişimi.

Şekil 4.17’de jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak, sistemin net iş çıktısında ve sisteme giren ısı enerjisinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığının artması ile birlikte, net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 120°C ile minimum olduğu durumda, net iş çıktısı 1770 kW ve sisteme giren ısı girişi 21,473 kW olmuştur. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda, net iş çıktısının 3004 kW, sisteme giren ısı girişinin ise 32,385 kW olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.

4.1.3 Model 3'ün Termodinamik Analiz Sonuçları

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenerasyon enerji sisteminin her bir hali için enerji ve ekserji özellikleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Sistemin ölü hal özellikleri 25°C ve 100 kPa kabul edilerek ekserji oranları hesaplanmıştır. Isı kaynağı olan jeotermal akışkan ve Therminol VP-1 akışkanını ile ORC çevriminde dolaşan R134a akışkanının termodinamik özellikleri, bir bilgisayar paket yazılım programı olan EES aracılığıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10 Sistemin her noktası için akışkan bilgileri ve termodinamik özellikler.

Durum	Akışkan	Faz	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg•K)	Özgül ekserji ex (kJ/kg)	Ekserji oranı Ex (kW)
0	Hava	Ölü hal	25	100	298.6	5.695	0	0
0'	Jeotermal	Ölü hal	25	100	104.8	0.3672	0	0
0''	Ther-VP1	Ölü hal	25	100	20	0.067	0	0
0'''	R134a	Ölü hal	25	100	276.4	1.105	0	0
0''''	Su	Ölü hal	25	100	104.2	0.365	0	0

Çizelge 4.10 (Devam)

1	R134a	Sıvı	26.8	700	88.8	0.3323	43.01	3871
2	R134a	Sıvı	28.7	3500	91.6	0.3337	45.34	4081
3	R134a	Buhar	124.9	3500	332.5	1.013	83.96	7556
4	R134a	Buhar	61.6	700	299.8	1.030	46.17	4155
5	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	0	0
6	Su	Sıvı	33	100	137.7	0.4758	0.441	250.4
7	Jeotermal	Sıvı	130	270	546.4	1.635	63.77	5420
8	Jeotermal	Sıvı	70	31	292.5	0.9533	12.86	1093
9	Jeotermal	Sıvı	45	9.5	187.8	0.6366	2.59	220.6
10	Ther-VP1	Sıvı	60	100	77.9	0.2515	3.27	2.61
11	Ther-VP1	Sıvı	60	100	77.9	0.2515	3.27	2.61
12	Ther-VP1	Sıvı	190.5	100	317.2	0.8535	63.16	50.5
13	Ther-VP1	Sıvı	90	100	127.4	0.3935	10.4	8.3
14	Su	Sıvı	35	100	146.1	0.5031	0.68	58.6
15	Su	Sıvı	60	100	250.6	0.8294	7.97	681.6
16	Su	Sıvı	25	100	104.2	0.365	900	1.156
17	Hidrojen	Gaz	25	100	-	64.81	236100	1807
18	Oksijen	Gaz	25	100	-	6.41	3970	0.957

Yapılan termodinamik analiz sonucunda, jeotermal akışkan ve ısı transfer akışkanından (Therminol VP-1) kojenerer enerji sistemine 30,713 kW ısı ve 5679 kW ekserji girişi olmuştur. Elektrik enerjisinin üretildiği ORC çevrimine, 7 halinde jeotermal akışkan ve 12 halinde parabolik kollektörlerden gelen ısı transfer akışkanı tarafından 21,976 kW ısı girişi olmuştur. ORC çevriminde ikincil akışkan olan R134a akışkanın kütleli debisi 90 kg/s olarak hesaplanmıştır. ORC çevriminden elde edilen net iş 2420 kW olarak

hesaplanmıştır. ORC çevriminin enerji verimi %11.2 ve ekserji verimi %44.8 olarak hesaplanmıştır.

ORC çevriminde üretilen elektrik enerjisi, ihtiyaç olmadığı zamanlarda elektroliz ünitesi aracılığıyla hidrojen enerjisine dönüştürülerek depolanmıştır. Elektroliz işlemi sonucunda üretilen hidrojenin kütleli debisi 0.0154 kg/s olarak hesaplanmıştır. İhtiyaç olduğu zamanlarda hidrojen enerjisi yakıt hücresi tarafından tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye verilmiştir. Yakıt hücresinde üretilen elektrik 1670 kW olarak hesaplanmıştır. Elektroliz ünitesinin verimi 0.75 ve yakıt hücresinin verimi 0.90 kabul edilmiştir.

Jeotermal ve güneş enerjisi destekli kojenerasyon enerji sisteminin enerji verimi %37 ve ekserji verimi %59.2 hesaplanmıştır. İhtiyaç olmadığı durumlarda elektrik enerjisinin elektroliz işlemi ile hidrojen enerjisine dönüştürülüp depolandığı ve ihtiyaç halinde yakıt hücresinde tekrar elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistem hesaba katıldığında ise sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %34.5 ve %46'dır. Elektroliz işlemi sırasında ve yakıt hücresinde meydana gelen kayıplardan dolayı sistemin enerji ve ekserji veriminde azalma meydana gelmiştir. Çizelge 4.11'de her bir sistemin enerji ve ekserji verimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Model 3 için enerji ve ekserji verimliliği.

Sistem	η_{enerji} (%)	$\epsilon_{\text{ekserji}}$ (%)
ORC Güç Santrali	11.2	44.8
Model 3 geneli (Depolama dahil)	34.5	46
Model 3 geneli	37	59.2

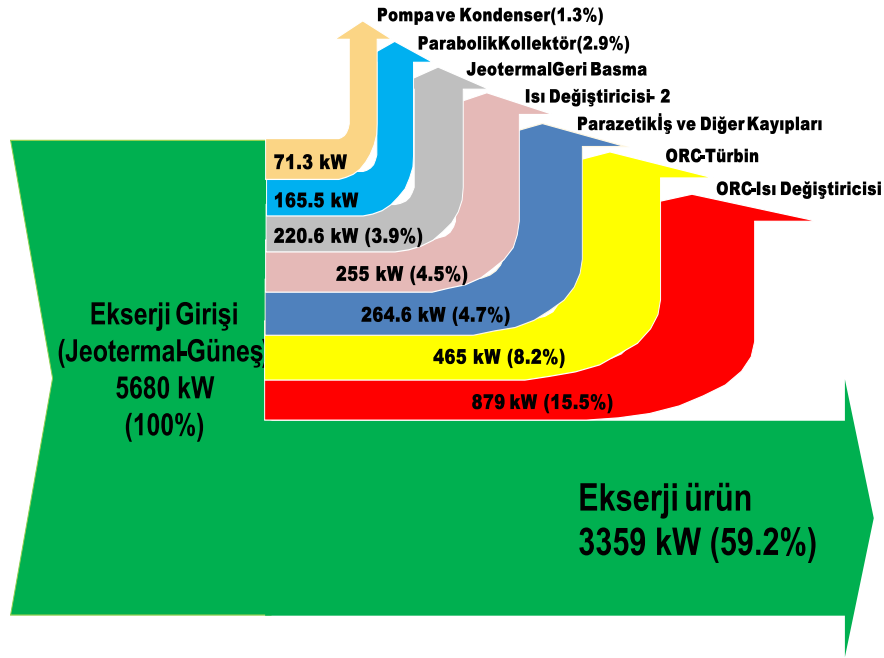
Çizelge 4.12'de sistemin tüm alt bileşenlerinin ısı, iş ve ekserji değeri her bir bileşen için verilmiştir. Ayrıca sistem alt bileşenlerinin her birinin ekserji kaybı ve ekserji verimi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12 Sistem alt bileşenlerinin gerekli olan enerji ve ekserji özellikleri.

Bileşenler	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_{in}$ (kW)	$\dot{E}x_{out}$ (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ (kW)	\mathcal{E} (%)
ORC-Türbin	-	2936	3401	2936	465	86.3
ORC-Pompa	-	247	247	209.5	37.5	84.8
ORC-Isı değiştiricisi	2168	-	4355	3476	879	79.8
ORC- Kondenser	1899	-	284.3	250.5	33.8	88
Isı değiştiricisi-2	8933	-	878.2	623	255.2	71
Parabolik Kollektör	219.5	-	272.7	107.2	165.5	19.8
Elektroliz Ünitesi	-	2420	2421.1	1808	613.1	74.6

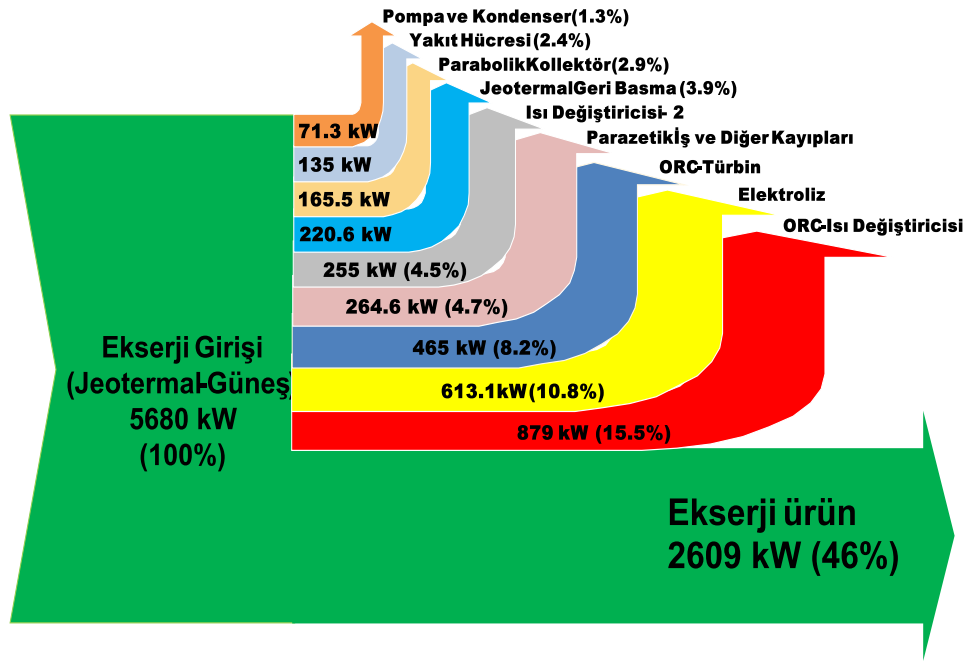
Aşağıda Model 3'e ait iki adet ekserji akış diyagramı gösterilmiştir. Bunlardan ilki elektroliz ünitesi ve yakıt hücrelerinin dahil edilmediği, başka bir ifadeyle elektrik enerjisinin depolanmayıp direk şebekeye verilerek kullanıldığı durum için akış diyagramıdır. İkinci diyagram ise elektroliz ünitesi ve yakıt hücrelerinin dahil edildiği, elektrik enerjisinin depolandığı durum için akış diyagramıdır. Kojenerasyon enerji sistemine ekserji girdisi, yer altından basılan jeotermal akışkan ve parabolik kollektörlere güneş enerjisi tarafından sağlanan ekserji girişidir. Sistemden ekserji çıktışı ise, üretilen elektrik enerjisi ve ısıtma kapasitesi ekserjisinin toplamıdır.

Giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile sistem ele alındığında, jeotermal ve ısı transfer akışkanı tarafından sisteme aktarılan ekserji girdisi 5680 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme aktarılan ekserji girdisinden, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıpları çıkarıldığında, elde edilen net ekserji 3359 kW'dır. Aşağıdaki ekserji akış diyagramından da anlaşılacağı üzere sisteme giren ekserjinin % 40.8'i kaybolmaktadır. Geriye kalan ekserjinin % 59.2'lik kısmı ise iş ve ısıya dönüştürülebilmektedir.



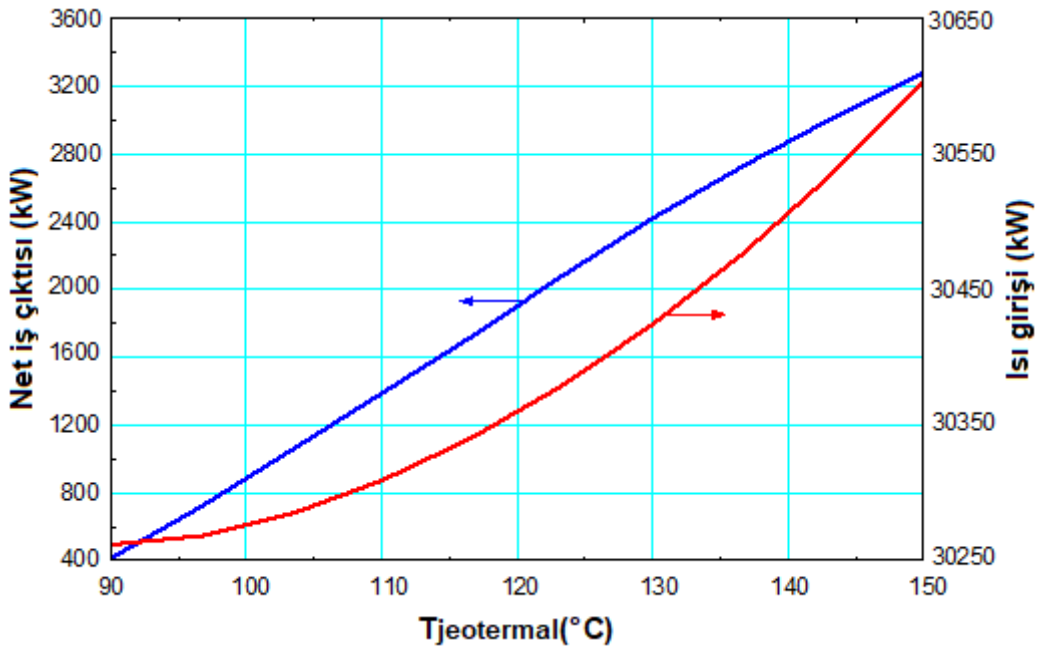
Şekil 4.18 Model 3 geneli için ekserji akış diyagramı.

Giren-çıkan ekserji yaklaşımı ile elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin dahil edildiği sistem ele alındığında, jeotermal ve ısı transfer akışkanı tarafından sisteme aktarılan ekserji girdisi 5680 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme aktarılan ekserji girdisinden, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıpları çıkarıldığında, elde edilen net ekserji 2609 kW'dır. Elektroliz ünitesinde ve yakıt hücresinde meydana gelen ekserji kayıplarından dolayı sistemin ekserji çıkışında azalma meydana gelmiştir. Aşağıdaki ekserji akış diyagramında görüleceği üzere sisteme giren ekserjinin %54'i kaybolmaktadır. Geriye kalan ekserjinin %46'lık kısmı ise işe ve ısıya dönüştürülebilmektedir.



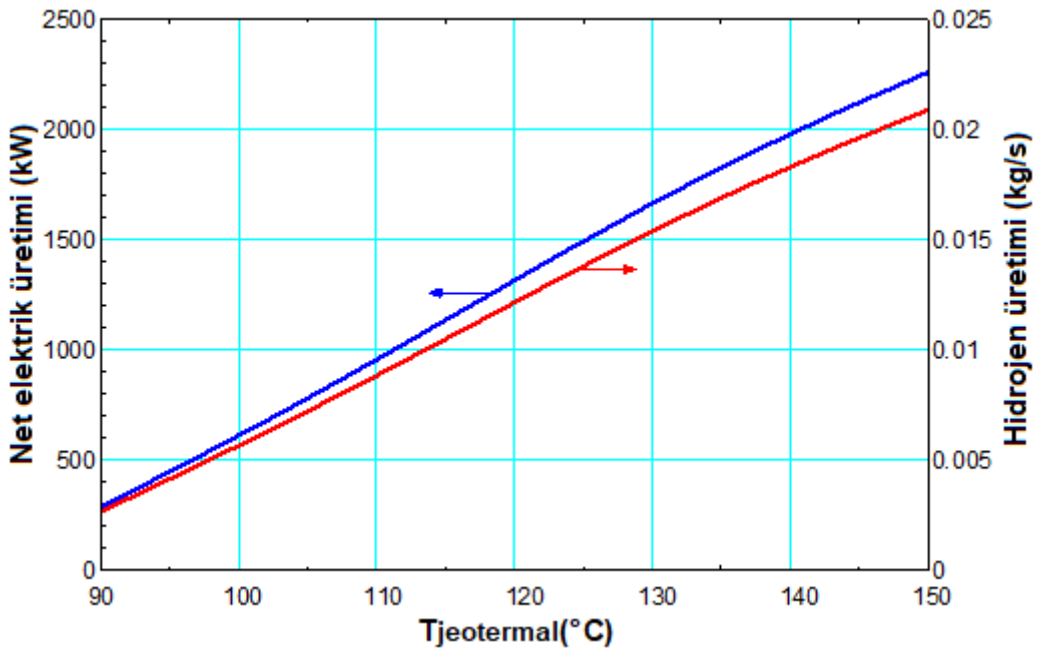
Şekil 4.19 Model 3 geneli için ekserji akış diyagramı.

Aşağıda Model 3'e ait parametrik çalışma sonuçlarını gösteren şekiller verilmiştir. Şekil 4.20'de jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısında ve ısı girişinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığının artması ile birlikte, net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin arttığı gözlemlenmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda, net iş çıktısı 415.9 kW ve sisteme giren ısı girişi 30,260 kW olmuştur. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda net iş çıktısının 3279 kW, sisteme giren ısı girişinin ise 30,600 kW olduğu gözlemlenmiştir.



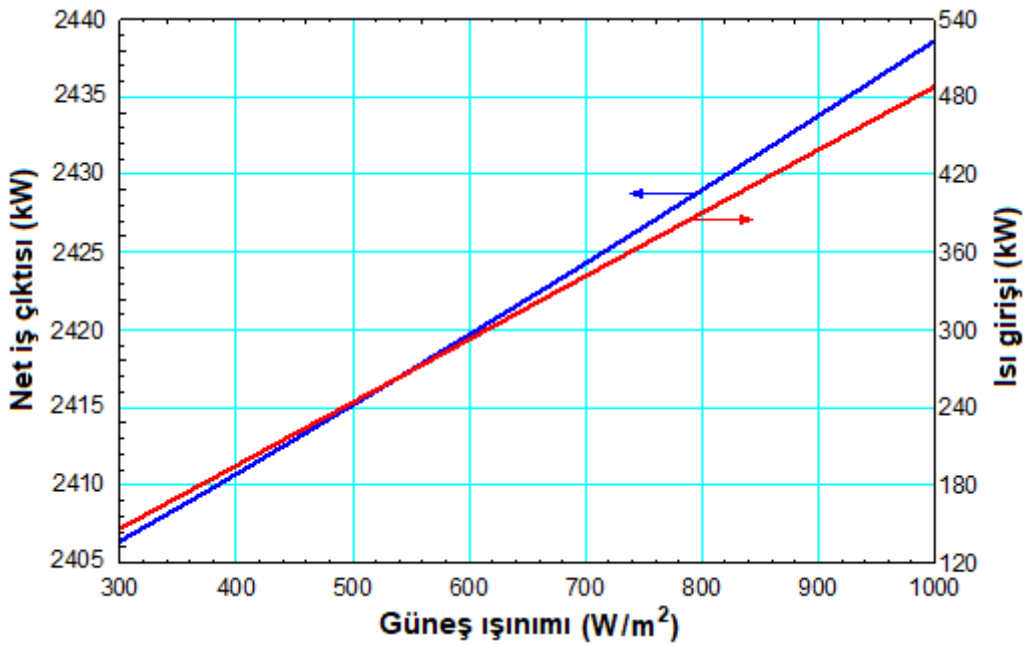
Şekil 4.20 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak net iş çıktısının ve ısı girişinin değişimi.

Şekil 4.21’de jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak, sistemin elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, jeotermal akışkanın çıkış sıcaklığı arttıkça, sistemin net elektrik ve hidrojen üretiminde lineer bir şekilde yükseliş meydana gelmiştir.



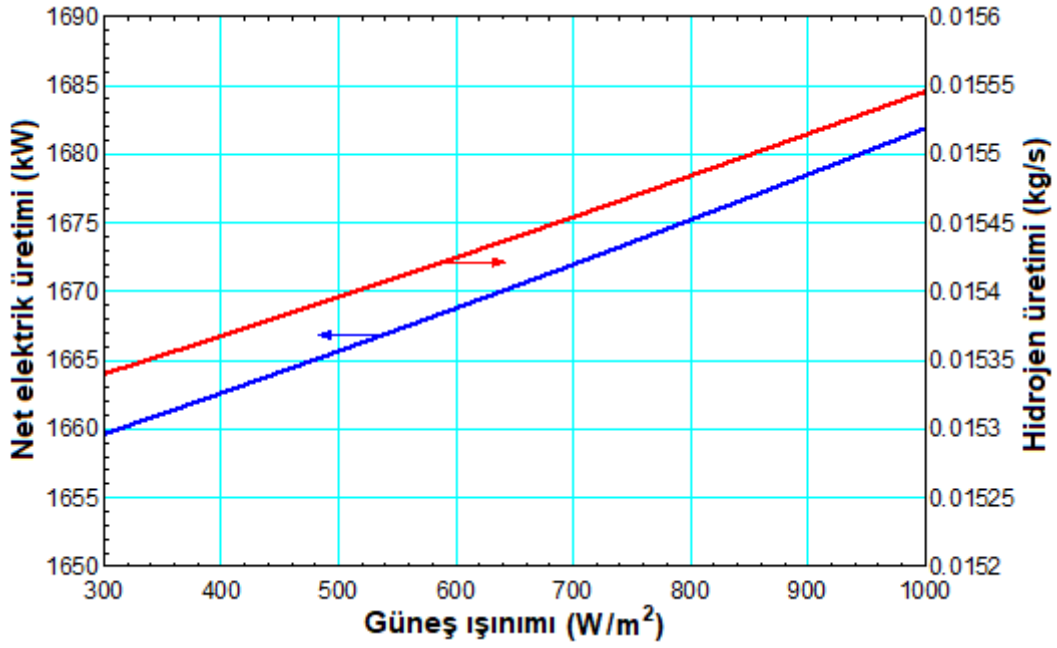
Şekil 4.21 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.

Şekil 4.21’de güneş ışınım şiddetinin bağlı olarak, net iş çıktısında ve ısı girişinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, güneş ışınım şiddetinin azalması ile net iş çıktısının ve ısı enerjisinin düştüğü, güneş ışınım şiddetinin artması ile doğru orantılı bir şekilde net iş çıktısının ve ısı enerjisinin yükseldiği görülmektedir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 ile minimum olduğu durumda, net iş çıktısı 2406 kW, giren ısı enerjisi 146.4 kW olmaktadır. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m^2 ile maksimum olduğu durumda net iş çıktısının 2439 kW, giren ısı enerjisinin ise 487.9 kW olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak net iş çıktısının ve giren ısı enerjisinin değişimi.

Şekil 4.23’de güneş ışınım şiddetinin bağlı olarak, sistemin elektrik ve hidrojen üretiminde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde güneş ışınım şiddetinin artması ile birlikte elektrik ve hidrojen üretiminin arttığı gözlemlenmiştir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 ile minimum olduğu durumda, elektrik üretimi 1660 kW ve hidrojen üretimi 0.0153 kg/s olmaktadır. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m^2 ile maksimum olduğu durumda ise elektrik üretimi 1682 kW ve hidrojen üretimi 0.0155 kg/s olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak elektrik ve hidrojen üretiminin değişimi.

4.2 Modellerin Termoekonomik Analiz Sonuçları

4.2.1 Model 1'in Termoekonomik Analiz Sonuçları

4.2.1.1 Parabolik Oluklu Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santralinin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Aşağıda güneş enerji santrali için oluşturulan Çizelge 4.13'de model ekipmanlarının satın alma maliyetleri (PEC) ve maliyet oranı (Z) hesaplanmıştır. Bu bağlamda modelde kullanılan ekipmanların toplam satın alma maliyetleri (PEC) 3,012,344 \$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.13 Güneş enerji santralinin satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).

Model bileşenleri	PEC (\$)	Z (\$/h)
Pompa	200,000	3.434
Isı değiştirici	750,000	12.880
Türbin	1,000,000	17.172

Çizelge 4.13 (Devam)

Su soğutmalı kondenser	300,000	5.151
Parabolik kolektör*	762,350	13.093
Toplam satın alma maliyeti (PEC)	3,012,344	-

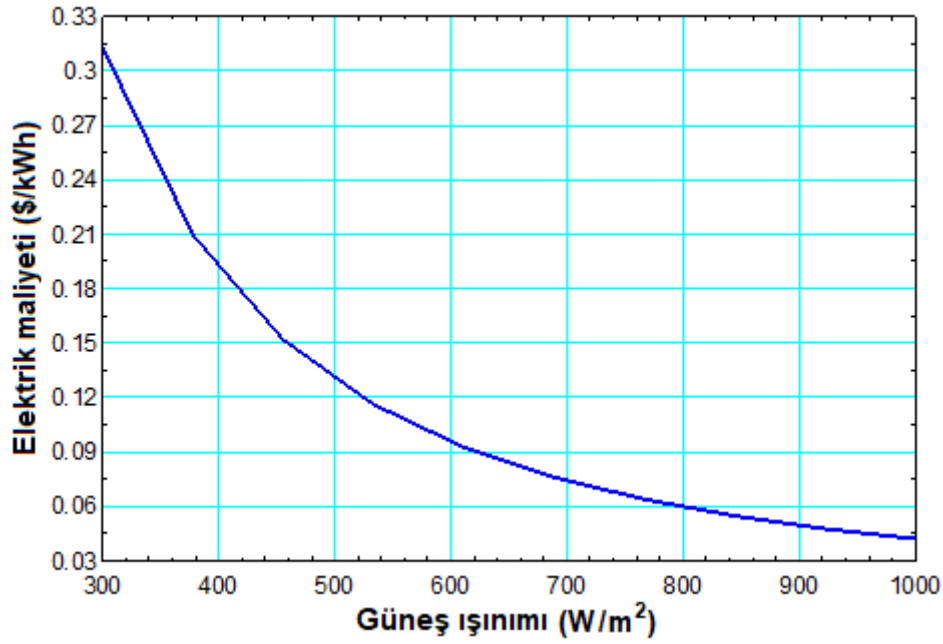
*Parabolik güneş kolektörünün ilk kurulum maliyeti (ICC), yoğunlaştırılmış güneş enerji santrallerinin (CSP) termoeconomik analizleri dikkate alınarak 250 \$/m² olarak referans alınmıştır (Turchi vd. 2019, Starke vd. 2018, Dieckmann vd. 2017).

Çizelge 4.14'deki sonuçlar, ekserji maliyet denklemlerinin EES programında yazılarak bilgisayar ortamında çözümlenmesinden elde edilmiştir. Güneş enerjisi kaynağının kabulleri olan 190°C ve 0.2 kg/s olarak çalıştırılan güneş enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.095 \$/kWh (26.53 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. Bu yapılan ekserjiye bağlı maliyetlendirme yönteminin en önemli katkısı, sistem bileşenlerinin tersinmezliklerine bağlı olarak meydana gelen maliyet kaybını hesaplayabilmektir.

Çizelge 4.14 Güneş enerji santralinin Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
9	4.93	15.8	0.28	
10	15.27	38.2	21.02	
11	335.10	41.07	4.95	
12	78.75	41.07	1.16	
13	0	26.47	0	
14	18.91	88.68	6.03	
15	315.8	26.53	30.17	
16	765	6.2	17.08	
\dot{W}_{Pump}	13	26.47	1.24	
\dot{W}_{Turb}	220	26.47	20.96	
Elektrik	207	26.53	19.77	0.095 \$/kWh

Şekil 4.24’de güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, güneş enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde güneş ışınım şiddetinin artması ile birlikte üretilen elektriğin birim maliyeti azalmaktadır. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m^2 ile minimum olduğu durumda üretilen elektriğin birim maliyeti $0.312 \text{ \$/kWh}$, 1000 W/m^2 ile maksimum olduğu durumda üretilen elektriğin birim maliyeti $0.042 \text{ \$/kWh}$ olmaktadır.



Şekil 4.24 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.

4.2.1.2 Binary Jeotermal Enerji Santralinin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Aşağıda jeotermal enerji santrali için oluşturulan Çizelge 4.15’de santral ekipmanlarının satın alma maliyetleri (PEC) ve maliyet oranı (\dot{Z}) hesaplanmıştır. Bu bağlamda modelde kullanılan ekipmanların toplam satın alma maliyetleri (PEC) $2,250,000 \text{ \$}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.15 Jeotermal enerji santralının satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).

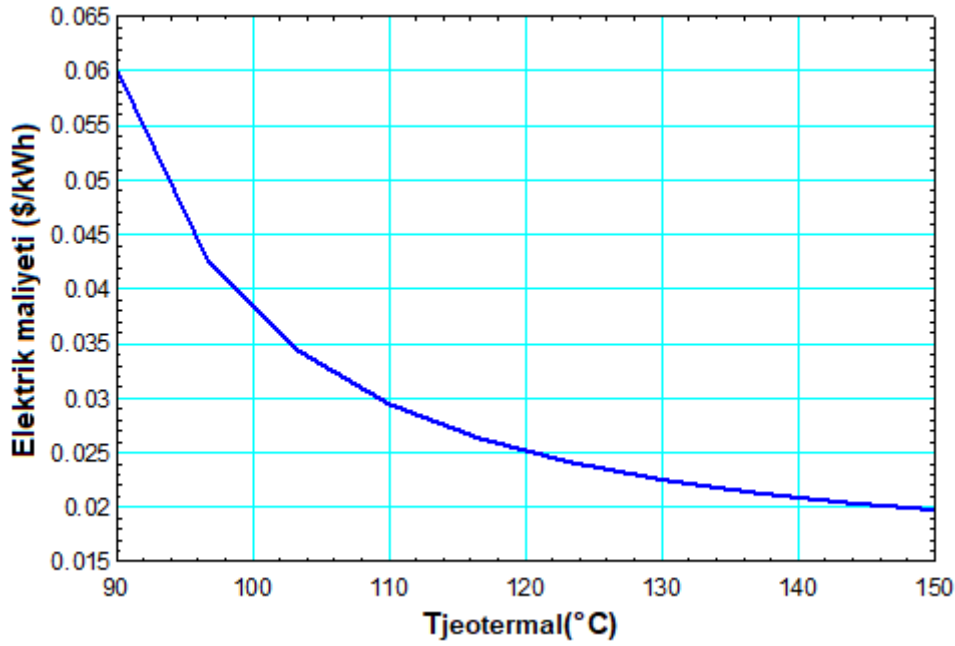
Model bileşenleri	PEC ($\times 10^3$ \$)	Z (\$/h)
Pompa	200,000	3.155
Isı değiştirici	750,000	11.829
Türbin	1,000,000	15.775
Su soğutmalı kondenser	300,000	47.34
Toplam satın alma maliyeti (PEC)	2,250,000	-

Çizelge 4.16'daki sonuçlar, ekserji maliyet denklemlerinin EES programında yazılarak bilgisayar ortamında çözümlenmesinden elde edilmiştir. Jeotermal enerji kaynağının kabulleri olan 130°C ve 85 kg/s olarak çalıştırılan jeotermal enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.022 \$/kWh (6.37 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.16 Jeotermal enerji santralının Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
1	3156	5.40	61.37	
2	3269	5.98	70.36	
3	7333	4.56	120.5	
4	3751	4.56	61.62	
5	6800	1.37	33.58	
6	1161	1.37	5.73	
7	0	6.37	0	
8	399	6.37	9.15	
\dot{W}_{Pump}	133.4	6.37	3.06	
\dot{W}_{Turb}	3125	6.37	71.74	
Elektrik	2693	6.37	61.81	0.022 \$/kWh

Şekil 4.25’de jeotermal akışkan sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, jeotermal akışkan sıcaklığının artmasıyla jeotermal enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti azalmaktadır. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda üretilen elektriğin birim maliyeti 0.060 \$/kWh, 150°C ile maksimum olduğu durumda 0.019 \$/kWh olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.25 Jeotermal akışkan sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.

4.2.1.3 Elektroliz Ünitesi ve Yakıt Hücresinin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Aşağıda elektroliz ünitesi ve yakıt hücresi için oluşturulan Çizelge 4.17’de ekipmanların satın alma maliyetleri (PEC) ve maliyet oranları (\dot{Z}) verilmiştir. Kullanılan ekipmanların toplam satın alma maliyetleri (PEC) 7,675,918 \$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17 Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).

Model bileşenleri	PEC (\$)	Z (\$/h)
Elektroliz ünitesi	4,345,500	72.648
Yakıt hücresi	3,330,418	55.69
Toplam satın alma maliyeti (PEC)	7,675,918	-

*Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin ilk kurulum maliyetleri (ICC) 1500 \$/kW olarak referans alınmıştır (Ozden ve Tari 2017, Andrews ve Shabani 2012).

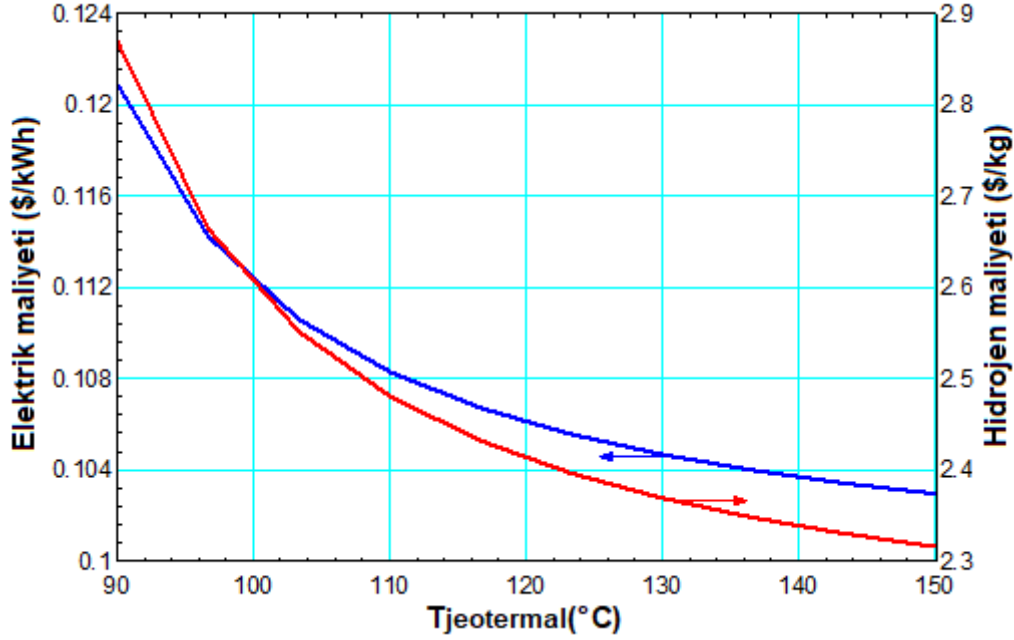
Çizelge 4.18'deki sonuçlar, ekserji maliyet denklemlerinin EES programında yazılarak bilgisayar ortamında çözümlenmesinden elde edilmiştir. Jeotermal ve güneş enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin, elektroliz ünitesinde kullanılmasıyla üretilen hidrojenin ekserjetik birim maliyeti ise 2.376 \$/kg hidrojen (19.76 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. Bu işlemde elektroliz suyu elektroliz ünitesine 25°C ve 100 kPa'da girmektedir. Hidrojenin tekrardan elektriğe dönüştürüldüğü yakıt hücresinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.105 \$/kWh (29.13 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18 Elektroliz ünitesi ve yakıt hücresinin Şekil 3.1'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
17	1.384	2.08	0.010	
18	2163	19.77	153.9	
19	1.146	2.08	0.008	
Hidrojen	2163	19.77	153.9	2.376 \$/kg
Elektrik	2220	29.13	232.8	0.105 \$/kWh

Şekil 4.26'da jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının artması ile birlikte üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyeti azalmaktadır. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C olduğu durumda elektriğin birim

maliyeti 0.121 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti 2.87 \$/kg olmaktadır. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C olduğu durumda elektriğin birim maliyeti 0.102 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti 2.31 \$/kg olmaktadır.



Şekil 4.26 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektrik ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.

4.2.2 Model 2'nin Termoekonomik Analiz Sonuçları

Aşağıda Model 2 için oluşturulan Çizelge 4.19'da model ekipmanlarının satın alma maliyetleri (PEC) ve maliyet oranı (\dot{Z}) hesaplanmıştır. Bu bağlamda modelde kullanılan ekipmanların toplam satın alma maliyetleri (PEC) 1,554,100 \$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19 Model 2'nin satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).

Model bileşenleri	PEC (\$)	Z (\$/h)
ORC-Pompa	70,000	1.17
ORC-Isı değiştirici	325,000	5.43
ORC-Türbin	480,000	8.028
ORC- Kondenser	325,000	5.436
Pompa-1	5000	0.083
Genleşme vanası-1	5000	0.083
Isı değiştiricisi-1	22,000	0.367
Jeneratör	100,000	1.672
Kondenser	26,900	0.449
Genleşme vanası-2	5000	0.083
Evaporatör	11,500	0.192
Absorber	94,200	1.575
Isı değiştiricisi-2	11,500	0.192
Parabolik kollektör	72,000	1.203
Pompa-2	1000	0.016
Toplam satın alma maliyeti (PEC)	1,554,100	-

Çizelge 4.20'deki sonuçlar, ekserji maliyet denklemlerinin EES programında yazılarak bilgisayar ortamında çözümlenmesinden elde edilmiştir. 7 halinde 130°C sıcaklık ve 85 kg/s kütleli debiye sahip jeotermal akışkan ve 10 halinde 145°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debiye sahip ısı transfer akışkanı ile çalıştırılan absorpsiyonlu soğutma çevriminde birim soğutma maliyeti 0.074 \$/kWh (20.77 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. 8 halinde 120°C sıcaklık ve 85 kg/s kütleli debiye sahip jeotermal akışkan ve 11 halinde 135°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debiye sahip ısı transfer akışkanı ile çalıştırılan enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.016 \$/kWh (4.71 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır.

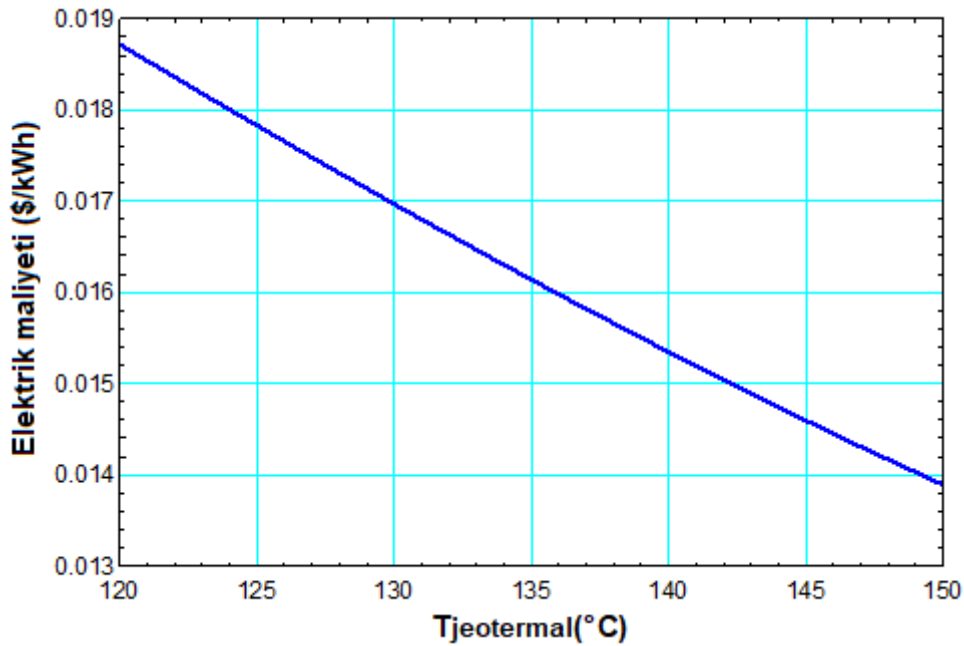
Çizelge 4.20 Model 2'nin Şekil 3.2'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
1	3871	3.595	50.1	
2	4043	3.759	54.71	
3	7278	3.353	87.85	
4	4167	3.353	50.3	
5	0	0	0	
6	167.9	9.325	5.635	
7	5420	1.372	26.77	
8	4505	1.372	22.25	
9	676.8	1.372	3.343	
10	27.32	1.281	1.26	
11	23.1	1.063	8.855	
12	0.16	8.024	0.004	
13	0.19	126.8	0.088	
14	45.18	46.16	7.508	
15	108.9	22.96	9	
16	12.53	22.96	1.036	
17	12.51	22.96	1.034	
18	603.2	0.041	0.088	
19	3.35	0.041	0.0004	
20	-11.79	0.041	0.001	
21	-216.3	0.041	0.031	
22	10.82	0	0	
23	104.1	0.593	0.222	
24	10.82	0.593	0.023	
25	28.78	0	0	
26	5.237	20.77	0.391	

Çizelge 4.20 (Devam)

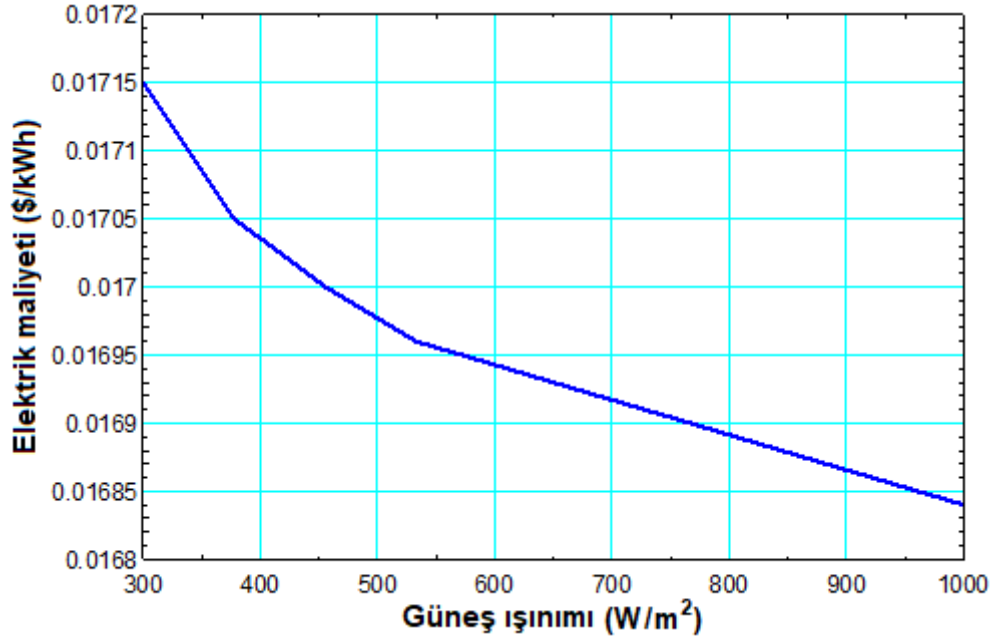
27	2.5	6.2	0.055	
28	2.5	6.2	0.055	
$\dot{W}_{ORC,Pump}$	202.9	4.713	3.442	
\dot{W}_{Turb}	2687	4.713	45.58	
Elektrik	2235	4.713	37.92	0.016 \$/kWh
Soğutma	2720	20.77	203.37	0.074 \$/kWh

Şekil 4.27’de jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetinde meydana gelen değişim gösterilmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının artmasıyla üretilen elektriğin birim maliyeti lineer bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 4.27 Jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.

Şekil 4.28’de güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim gösterilmiştir. Güneş ışınım şiddetinin artması ile birlikte üretilen elektriğin birim maliyetinde azalma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin birim maliyetindeki değişim.

4.2.3 Model 3'ün Termoekonomik Analiz Sonuçları

Çizelge 4.21'de ekipmanların satın alma maliyetleri ve maliyet oranı verilmiştir. Ekipmanların toplam satın alma maliyeti (PEC) 8,687,060 \$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21 Model 3'ün satın alma maliyetleri ve maliyet oranları (Aspen Plus V11, 2015).

Model bileşenleri	PEC (\$)	Z (\$/h)
Pompa	150,000	2.508
Isı değiştirici	510,000	8.528
Türbin	750,000	12.542
Kondenser	430,000	7.189
Isı değiştiricisi-2	312,800	5.230
Elektroliz ünitesi	3,630,000	60.696
Yakıt hücresi	2,782,260	46.512
Parabolik kolektör	122,000	2.040
Toplam satın alma maliyeti (PEC)	8,687,060	-

Çizelge 4.22'deki sonuçlar, ekserji maliyet denklemlerinin EES programında yazılarak bilgisayar ortamında çözümlenmesinden elde edilmiştir. Jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji santralinde üretilen elektrik enerjisinin, elektroliz ünitesinde kullanılmasıyla üretilen hidrojenin ekserjetik birim maliyeti ise 1.629 \$/kg hidrojen (13.55 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. Bu işlemde elektroliz suyu elektroliz ünitesine 25 °C ve 100 kPa'da girmektedir. Hidrojenin tekrardan elektriğe dönüştürüldüğü yakıt hücresinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.080 \$/kWh (22.41 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. 70°C sıcaklık ve 85 kg/s kütleli debiye sahip jeotermal akışkanın 8 halinde ve 90°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debiye sahip ısı transfer akışkanının 13 halinde mahal ısıtma için giriş yaptığı ısı değiştiricisinde, birim ısıtma maliyeti 0.0074 \$/kWh (2.08 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca elektrik enerjisinin depolanmadan şebekeye verilip kullanıldığı durumlar için, jeotermal ve güneş enerjisi destekli enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti de hesaplanmıştır. 7 halinde 130°C sıcaklık ve 85 kg/s kütleli debiye sahip jeotermal akışkan ve 12 halinde 190°C sıcaklık ve 0.2 kg/s kütleli debiye sahip ısı transfer akışkanı ile çalıştırılan enerji santralinde üretilen elektriğin birim maliyeti (LCOE) 0.011 \$/kWh (3.15 \$/GJ) olarak hesaplanmıştır.

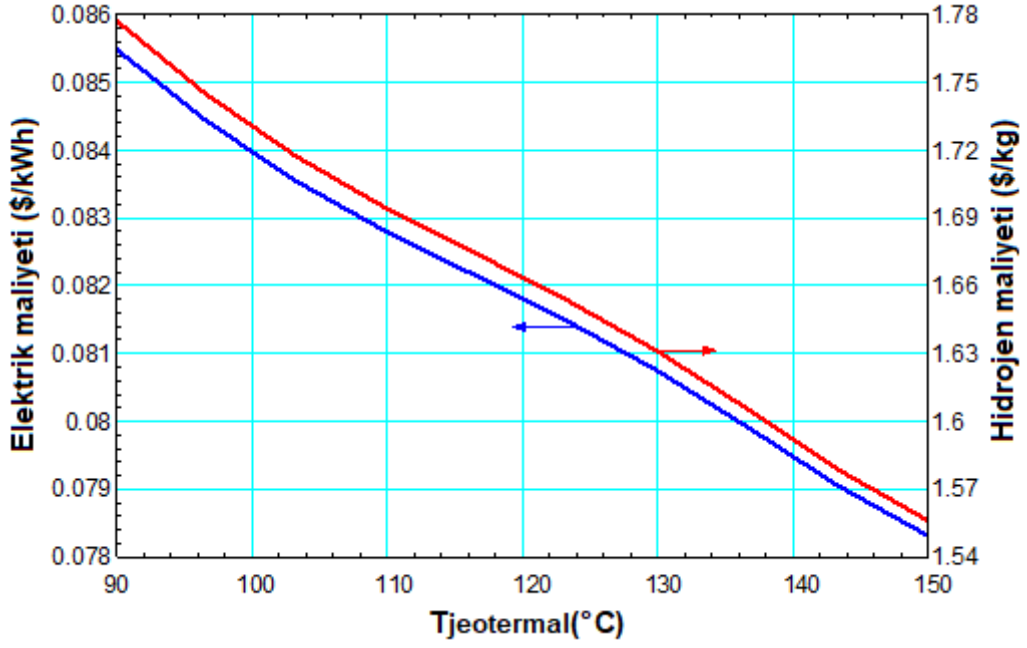
Çizelge 4.22 Model 3'ün Şekil 3.3'deki durum numaralarına göre ekserji akışı, maliyet akışı ve zamana bağlı birim ekserji maliyet akışları.

Durum	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/h)	Genel maliyet
1	3871	3.595	50.1	
2	4081	3.602	52.91	
3	7556	2.724	74.09	
4	4155	2.724	40.75	
5	0	3.157	0	
6	250.4	10.37	9.347	
7	5420	1.372	26.7	
8	1093	1.372	5.39	
9	220.6	1.372	1.089	
10	2.61	6.2	0.058	

Çizelge 4.22 (Devam)

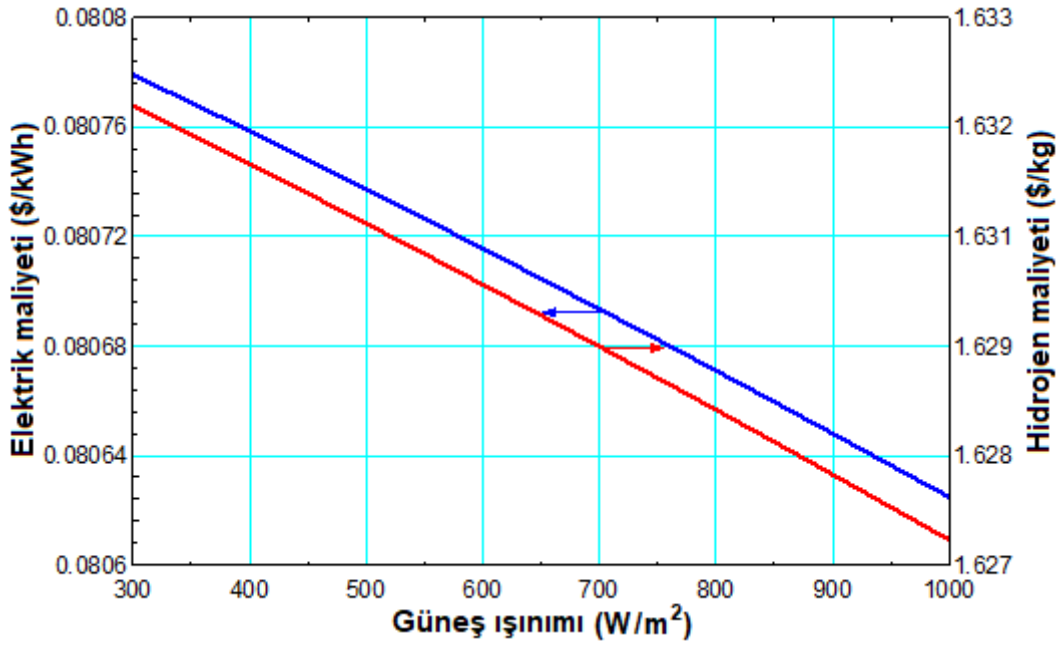
11	2.61	6.2	0.058	
12	50.5	0.332	0.060	
13	8.3	6.2	0.185	
14	58.6	3.157	0.666	
15	681.6	2.08	5.108	
16	1.156	2.08	0.008	
17	1807	13.55	88.13	
18	0.957	2.08	0.007	
\dot{W}_{Pump}	247	3.15	2.8	
\dot{W}_{Turb}	2936	3.15	33.29	
Hidrojen	1807	13.55	88.15	1.629 \$/kg
Isıtma	8933	2.08	66.89	0.007 \$/kWh
Elektrik _{PEM}	1670	22.41	134.72	0.080 \$/kWh
Elektrik _{ORC}	2420	3.15	27.44	0.011 \$/kWh

Şekil 4.29’da jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak, yakıt hücresinde üretilen elektriğin ve elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin birim maliyetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Jeotermal akışkanın sıcaklığının artmasıyla üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Jeotermal akışkan sıcaklığının 90°C ile minimum olduğu durumda elektriğin birim maliyeti 0.085 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti ise 1.777 \$/kg olmaktadır. Jeotermal akışkan sıcaklığının 150°C ile maksimum olduğu durumda elektriğin birim maliyeti 0.078 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti ise 1.556 \$/kg olmaktadır.



Şekil 4.29 Jeotermal akışkan sıcaklığına bağlı olarak üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.

Şekil 4.30'da güneş ışınım şiddetine bağlı olarak, yakıt hücresinde üretilen elektriğin ve elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin birim maliyetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Güneş ışınım şiddetinin artmasıyla birlikte üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Güneş ışınım şiddetinin 300 W/m² ile minimum olduğu durumda üretilen elektriğin birim maliyeti 0.0807 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti ise 1.632 \$/kg olmaktadır. Güneş ışınım şiddetinin 1000 W/m² ile maksimum olduğu durumda üretilen elektriğin birim maliyeti 0.0806 \$/kWh, hidrojenin birim maliyeti ise 1.627 \$/kg olmaktadır.

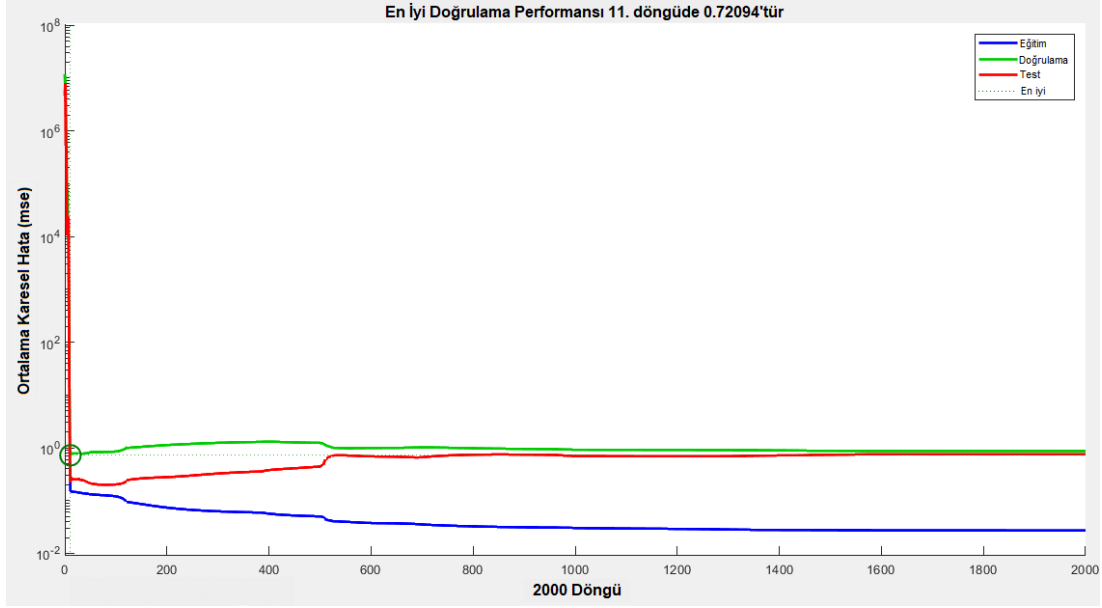


Şekil 4.30 Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak üretilen elektriğin ve hidrojenin birim maliyetindeki değişim.

4.3 Modellerin YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları

4.3.1 Model 1'in YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları

Model 1 için veri seti, eğitim için 80X8 ve test için 20X8 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA'da modellenen sistem 4 adet giriş ve 4 adet çıkıştan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA tabanlı sistem için performans sonuçları Şekil 4.31'de gösterilmiştir. YSA tabanlı sistem 2000 döngü (epoch) eğitim işlemine tabii tutulmuştur. Eğitim aşamasında 2000 döngünün sonucu olarak 7.20×10^{-1} ortalama kare hata (MSE) değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.31 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.

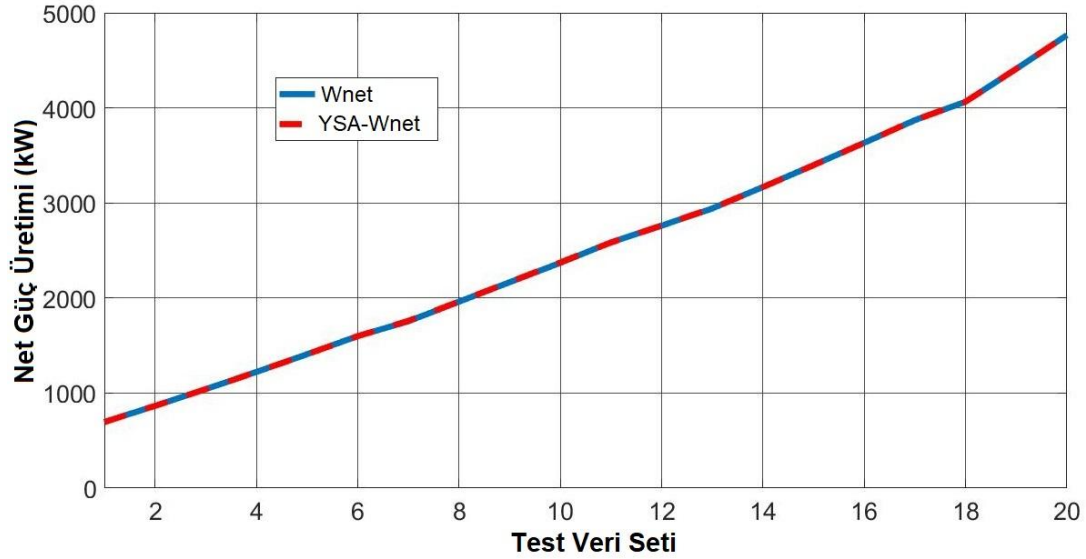
Eğitim aşamasından sonra test aşamasına geçilmiş ve 20X8'lik bir veri seti ile test aşaması tamamlanmıştır. EES programının gerçek analiz sonuçlarını içeren test veri seti referans alınarak ve YSA çıktı sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen performans değerlendirmesi sonucunda MAE, MSE, RMSE ve MAPE değerlendirme ölçütleri hesaplanmış ve Çizelge 4.23'de verilmiştir.

Çizelge 4.23 Model 1 için YSA tabanlı performans değerlendirme sonuçları.

Hata Analizi	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{W}_{FC} (kW)	\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	\dot{C}_{H_2} (\$/kg H ₂)
MAE	1.18 x 10E-1	7.63 x 10E-1	2.35 x 10E-3	3.53 x 10E-2
MSE	2.79 x 10E-1	1.09 x 10E-1	7.44 x 10E-6	2.08 x 10E-3
RMSE	1.67 x 10E-1	1.05 x 10E-1	2.73 x 10E-3	4.56 x 10E-2
MAPE	6.03 x 10E-4	5.33 x 10E-4	2.07 x 10E-2	1.33 x 10E-2

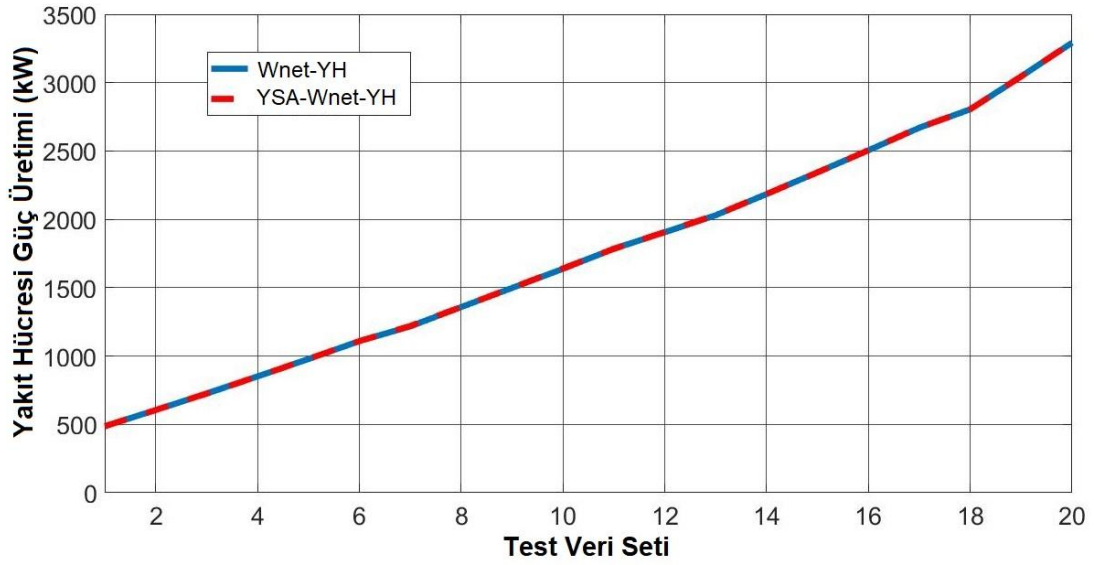
Çizelge 4.23'de sistemin güç üretim kapasitesi, yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi, üretilen elektrik ve hidrojen maliyeti için hesaplanmış değerlendirme ölçütleri verilmiştir. Performans değerlendirme sonuçlardan da anlaşılacağı üzere YSA tarafından üretilen tahmin sonuçları gerçek sonuçlara çok yakındır. Bu sonuçlar, yapılmış olan çalışmaya güven seviyesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Gerçek güç üretim kapasitesinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Güç üretim kapasitesi için YSA tabanlı tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9 olarak ölçülmüştür. YSA tabanlı test çıktıları neredeyse gerçek değerlere karşılık gelmiştir. Bu sonuçlar YSA’nın yüksek hassasiyetle güç üretim kapasitesini tahmin ettiğini göstermektedir.



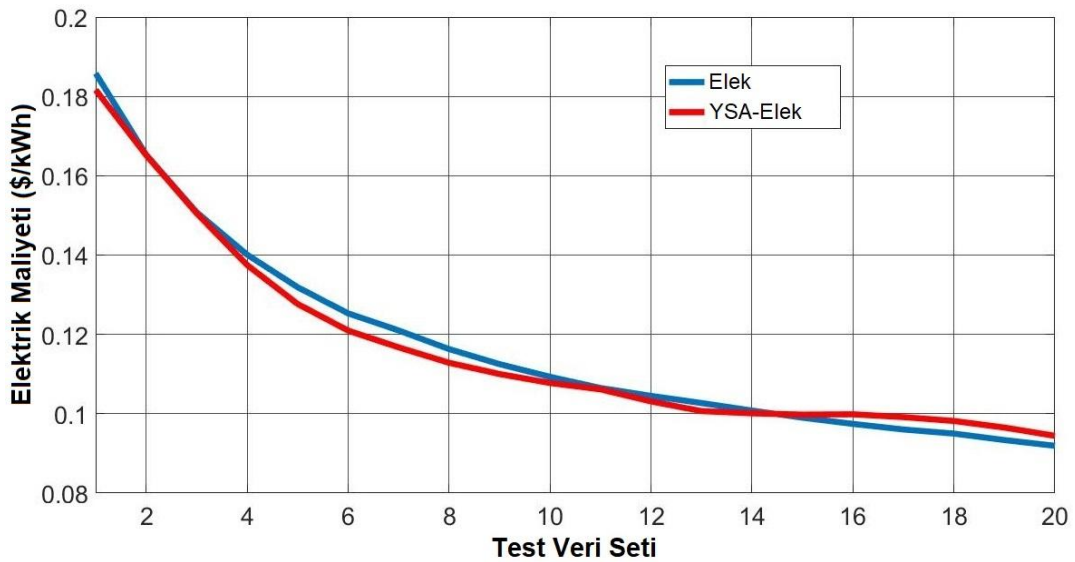
Şekil 4.32 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.

Şekil 4.33 gerçek yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi ile YSA tahmin verilerini göstermektedir. Yakıt hücresi güç üretim kapasitesi için YSA tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9’dur. Bu, tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.33 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini yakıt hücresi güç üretim kapasitesinin değişimi.

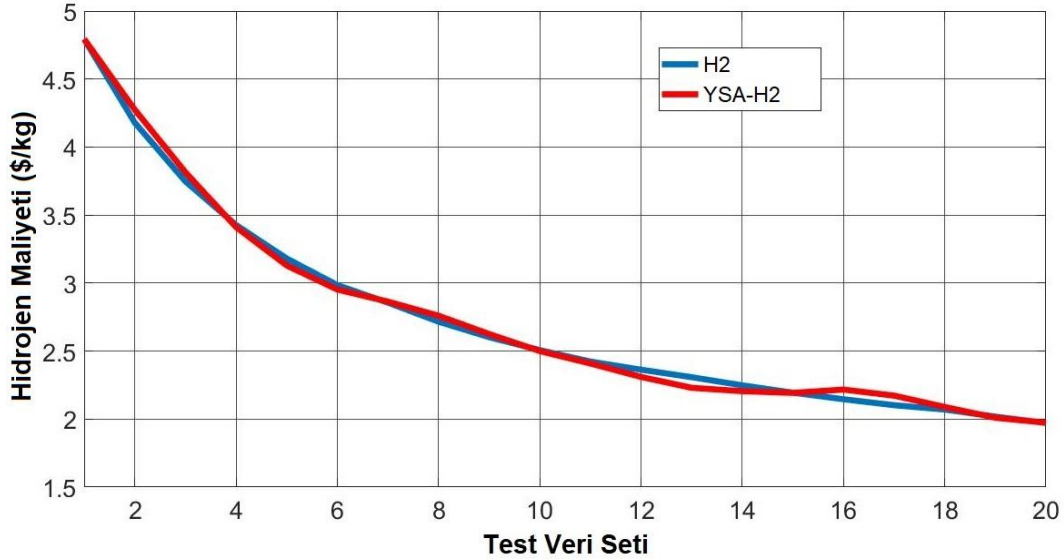
Gerçek elektrik maliyeti ile YSA tabanlı elektrik maliyeti tahmin sonuçlarını gösteren Şekil 4.34 aşağıda verilmiştir. YSA ile yapılan elektrik maliyeti tahminlerinin doğruluk seviyesi %97.9 hesaplanmıştır. Bu sonuç, elektrik maliyeti için YSA tahminlerinin doğruluk seviyesinin oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.34 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.

Gerçek hidrojen maliyetinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.35'de gösterilmiştir. YSA ile yapılan hidrojen maliyeti tahminlerinin doğruluk

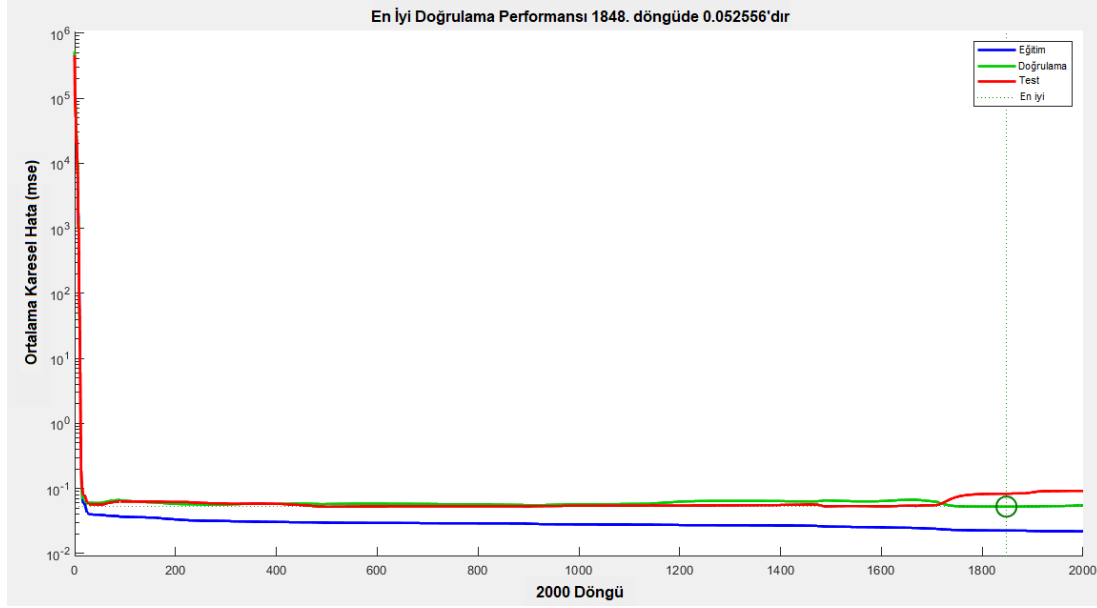
seviyesi %98.6 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, YSA tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.35 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini hidrojen maliyetinin değişimi.

4.3.2 Model 2'nin YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları

Model 2 için veri seti, eğitim için 80X8 ve test için 20X8 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA'da modellenen sistem 4 adet giriş ve 4 adet çıkıştan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA tabanlı sistem için performans sonuçları Şekil 4.36'da gösterilmiştir. YSA tabanlı sistem 2000 döngü (epoch) eğitim işlemine tabii tutulmuştur. Eğitim aşamasında 2000 döngünün sonucu olarak $5.25 \times 10E-2$ ortalama kare hata (MSE) değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.36 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.

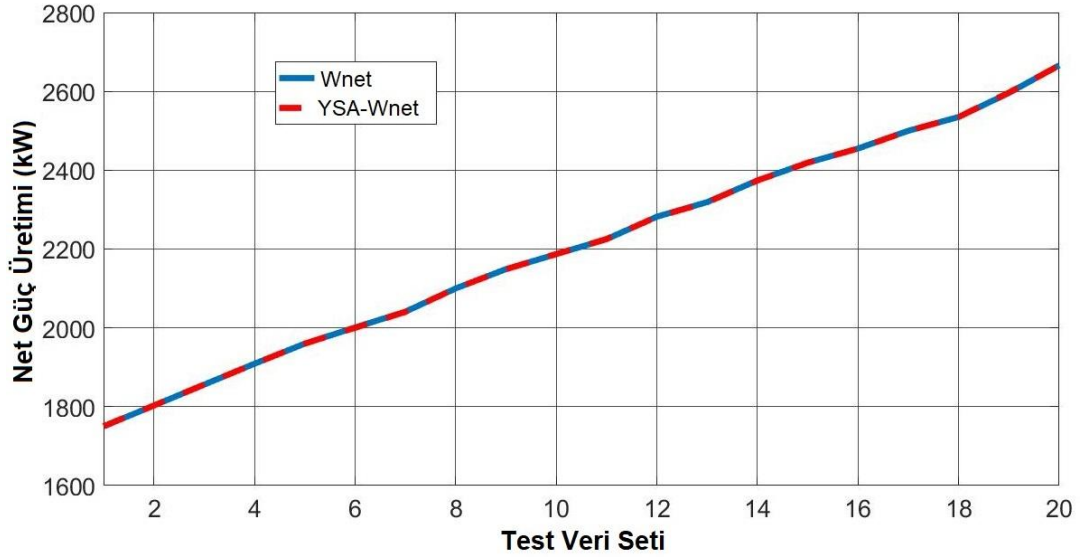
Eğitim aşamasından sonra test aşamasına geçilmiş ve 20X8'lik bir veri seti ile test aşaması tamamlanmıştır. EES programının gerçek analiz sonuçlarını içeren test veri seti referans alınarak ve YSA çıktı sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen performans değerlendirmesi sonucunda MAE, MSE, RMSE ve MAPE değerlendirme ölçütleri hesaplanmış ve Çizelge 4.24'de verilmiştir.

Çizelge 4.24 Model 2 için YSA tabanlı performans değerlendirme sonuçları.

Hata Analizi	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{eva} (kW)	\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	\dot{C}_{cool} (\$/kWh)
MAE	3.19 x 10E-1	3.52 x 10E-1	9.09 x 10E-5	2.41 x 10E-3
MSE	1.53 x 10E-1	1.61 x 10E-1	1.07 x 10E-8	8.88 x 10E-6
RMSE	3.92 x 10E-1	4.01 x 10E-1	1.04 x 10E-4	2.98 x 10E-3
MAPE	1.48 x 10E-4	1.27 x 10E-4	5.72 x 10E-3	2.72 x 10E-2

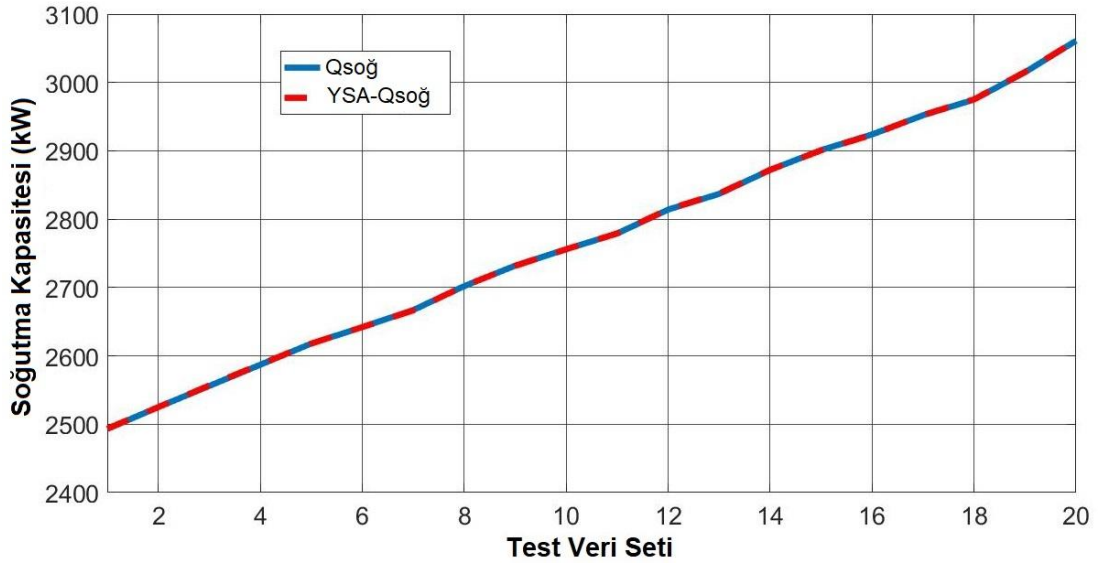
Çizelge 4.24'de sistemin güç üretim kapasitesi, soğutma kapasitesi, üretilen elektrik ve soğutma maliyeti için hesaplanmış değerlendirme ölçütleri verilmiştir. Performans değerlendirme sonuçları incelendiğinde YSA tarafından üretilen tahmin sonuçlarının gerçek sonuçlara çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler, yapılmış olan çalışmanın yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Gerçek güç üretim kapasitesinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Güç üretim kapasitesi için YSA tabanlı tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9 olarak ölçülmüştür. YSA tabanlı test çıktıları neredeyse gerçek değerlere karşılık gelmiştir. Bu sonuçlar YSA’nın yüksek hassasiyetle güç üretim kapasitesini tahmin ettiğini göstermektedir.



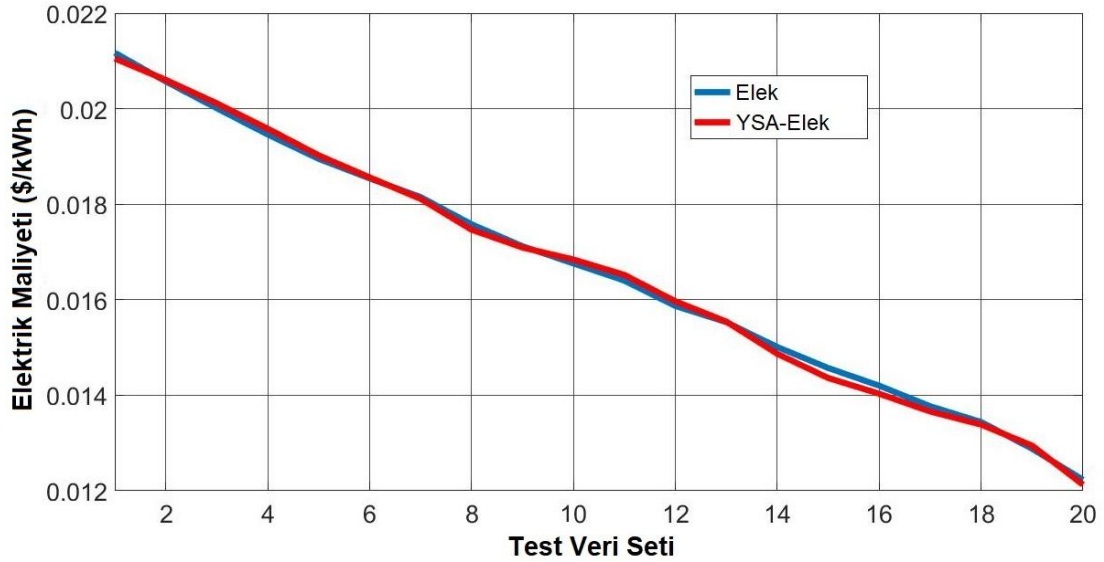
Şekil 4.37 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.

Şekil 4.38 absorpsiyonlu soğutma sisteminin soğutma kapasitesi ile YSA tahmin verilerini göstermektedir. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin soğutma kapasitesi için YSA tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9’dur. Bu, tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.38 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini soğutma kapasitesinin değişimi.

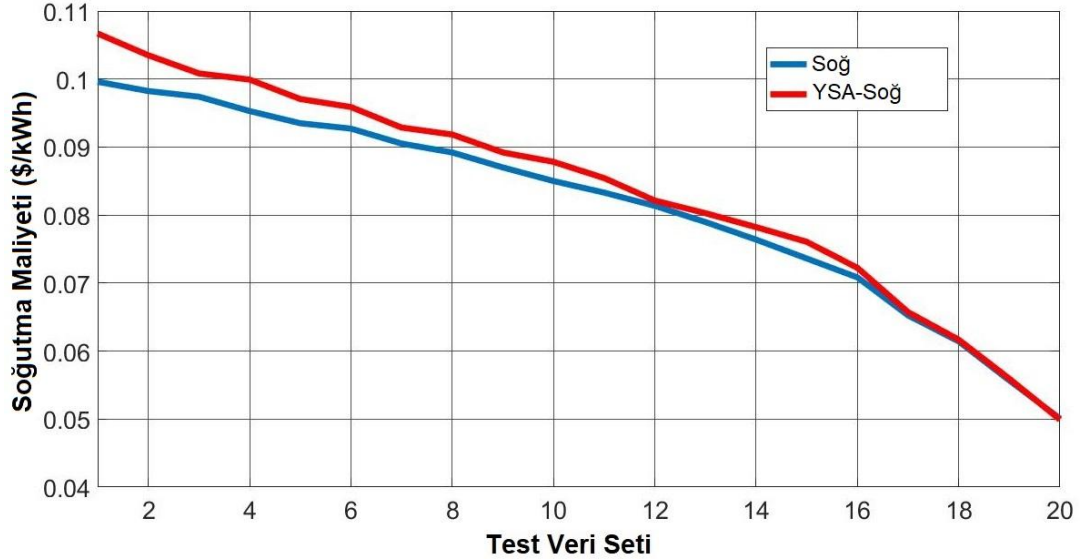
Gerçek elektrik maliyeti ile YSA tabanlı elektrik maliyeti tahmin sonuçlarını gösteren Şekil 4.39 aşağıda verilmiştir. YSA ile yapılan elektrik maliyeti tahminlerinin doğruluk seviyesi %99.4 hesaplanmıştır. Bu sonuç, elektrik maliyeti için YSA tahminlerinin doğruluk seviyesinin oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.39 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.

Gerçek soğutma maliyetinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.40'da gösterilmiştir. YSA ile yapılan soğutma maliyeti tahminlerinin doğruluk

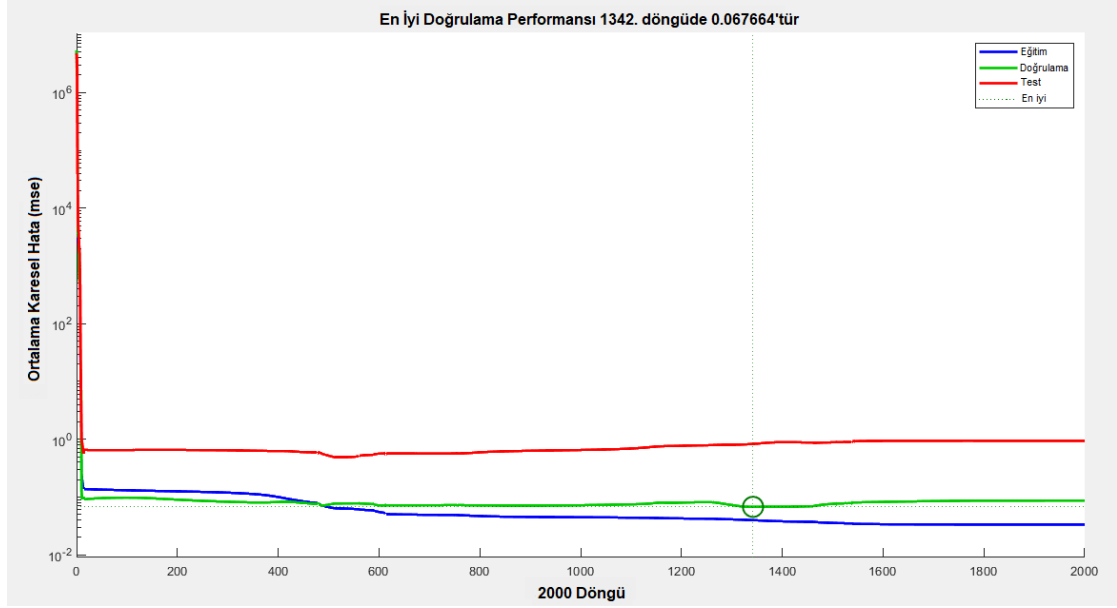
seviyesi %97.3 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, YSA tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.40 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini soğutma maliyetinin değişimi.

4.3.3 Model 3'ün YSA Yöntemi ile Tahmin Sonuçları

Model 3 için veri seti, eğitim için 80X10 ve test için 20X10 olmak üzere iki veri setine ayrılmıştır. YSA'da modellenen sistem 4 adet giriş ve 6 adet çıkıştan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA tabanlı sistem için performans sonuçları Şekil 4.41'de gösterilmiştir. YSA tabanlı sistem 2000 döngü (epoch) eğitim işlemine tabii tutulmuştur. Eğitim aşamasında 2000 döngünün sonucu olarak $6.76 \times 10E-2$ ortalama kare hata (MSE) değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.41 YSA tabanlı sistemin performans sonuçları.

Eğitim aşamasından sonra test aşamasına geçilmiş ve 20X10'luk bir veri seti ile test aşaması tamamlanmıştır. EES programının gerçek analiz sonuçlarını içeren test veri seti referans alınarak ve YSA çıktı sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen performans değerlendirmesi sonucunda MAE, MSE, RMSE ve MAPE değerlendirme ölçütleri hesaplanmış ve Çizelge 4.25'de verilmiştir.

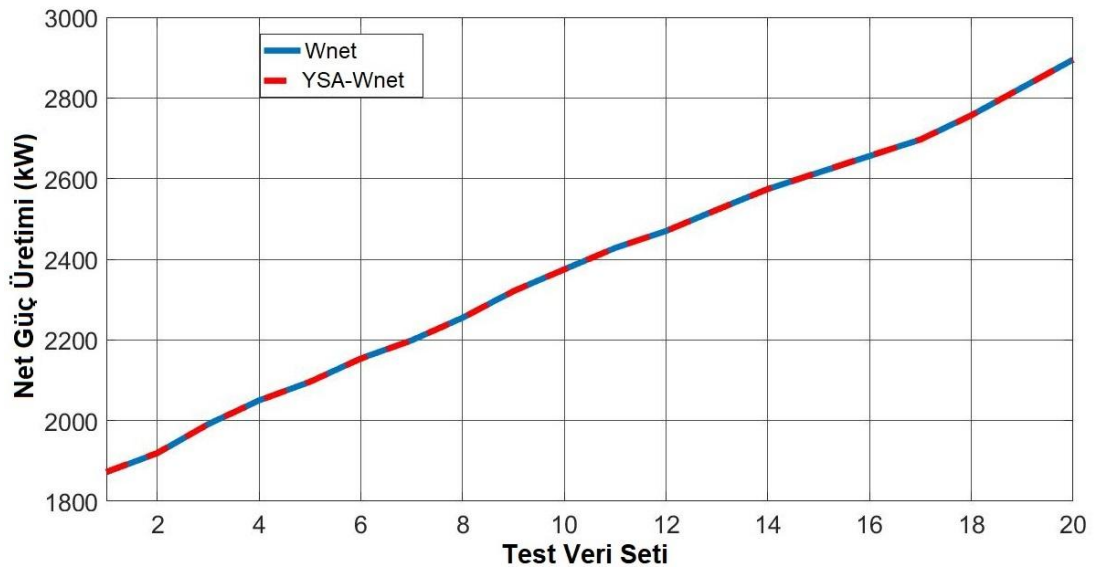
Çizelge 4.25 YSA tabanlı sistemin performans değerlendirme sonuçları.

Hata Analizi	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{W}_{FC} (kW)	\dot{Q}_{hex} (kW)	\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	\dot{C}_{H_2} (\$/kWh)	\dot{C}_{heat} (\$/kWh)
MAE	3.52x10E-1	2.7x10E-1	6.52x10E-1	1.01x10E-3	1.94x10E-3	4.92x10E-4
MSE	1.64x10E-1	1.03x10E-1	1.23x10E-1	1.77x 0E-6	7.13x 0E-6	5.05x 0E-7
RMSE	4.06x10E-1	3.21x10E-1	1.10x10E-1	1.33x10E-3	2.67x10E-3	7.11x10E-4
MAPE	1.54x10E-4	1.69x10E-4	6.92x10E-5	1.23x10E-2	1.16x10E-3	7.93x10E-2

Çizelge 4.25'de sistemin güç üretim kapasitesi, yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi, ısıtma kapasitesi, üretilen elektrik ile soğutma maliyeti ve yapılan ısıtma maliyeti için hesaplanmış değerlendirme ölçütleri verilmiştir. Performans değerlendirme sonuçlardan da anlaşılacağı üzere YSA tarafından üretilen tahmin sonuçları gerçek sonuçlara çok

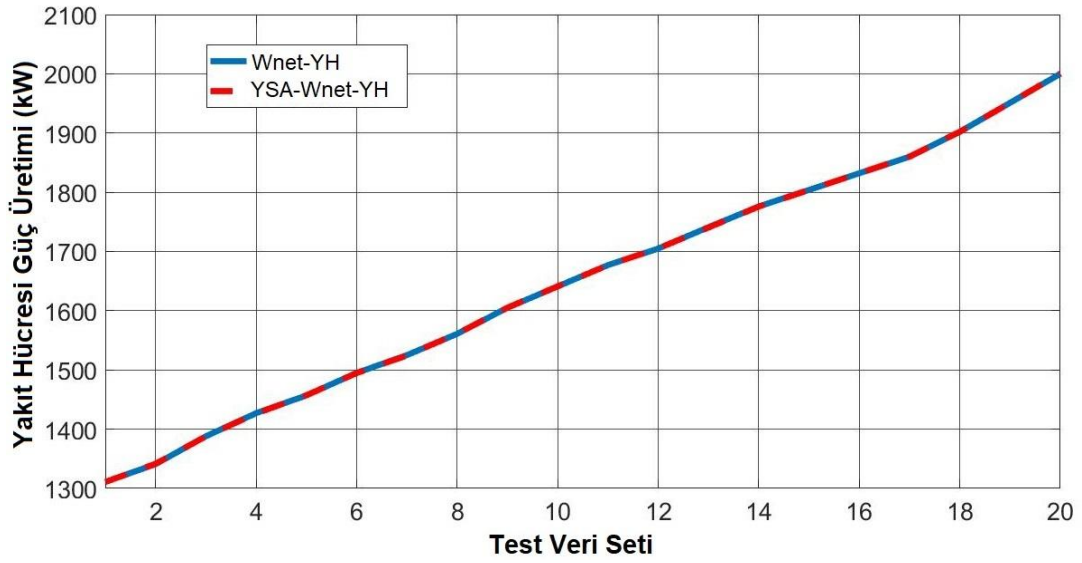
yakındır. Bu sonuçlar, yapılmış olan çalışmaya güven seviyesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Gerçek güç üretim kapasitesinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.42’de gösterilmiştir. Güç üretim kapasitesi için YSA tabanlı tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9 olarak ölçülmüştür. YSA tabanlı test çıktıları neredeyse gerçek değerlere karşılık gelmiştir. Bu sonuçlar YSA’nın yüksek hassasiyetle güç üretim kapasitesini tahmin ettiğini göstermektedir.



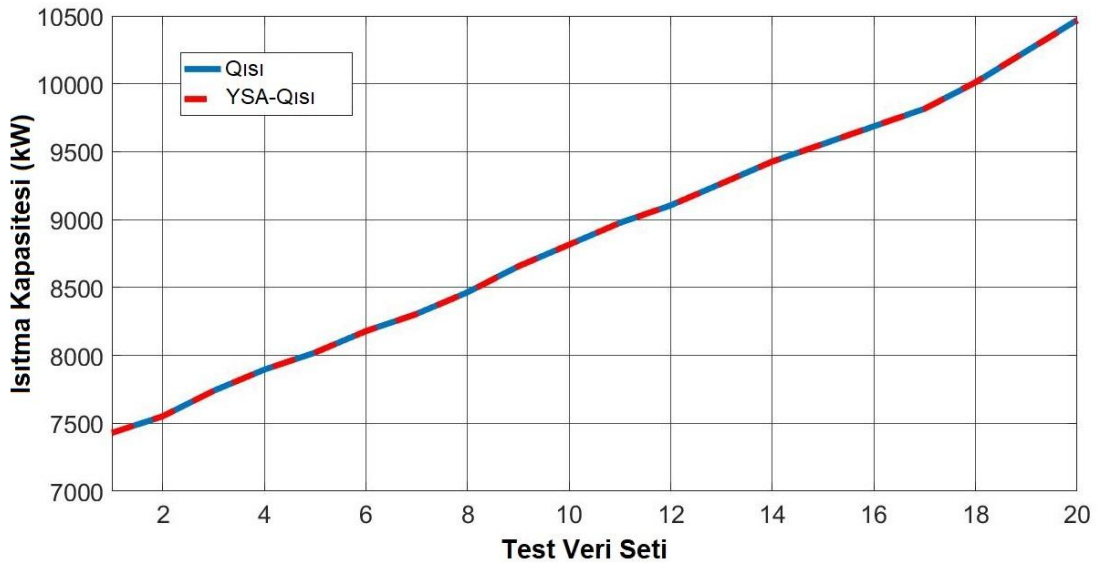
Şekil 4.42 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini güç üretim kapasitesinin değişimi.

Şekil 4.43 gerçek yakıt hücresinin güç üretim kapasitesi ile YSA tahmin verilerini göstermektedir. Yakıt hücresi güç üretim kapasitesi için YSA tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9’dur. Bu, tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.43 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini yakıt hücresi güç üretim kapasitesinin değişimi.

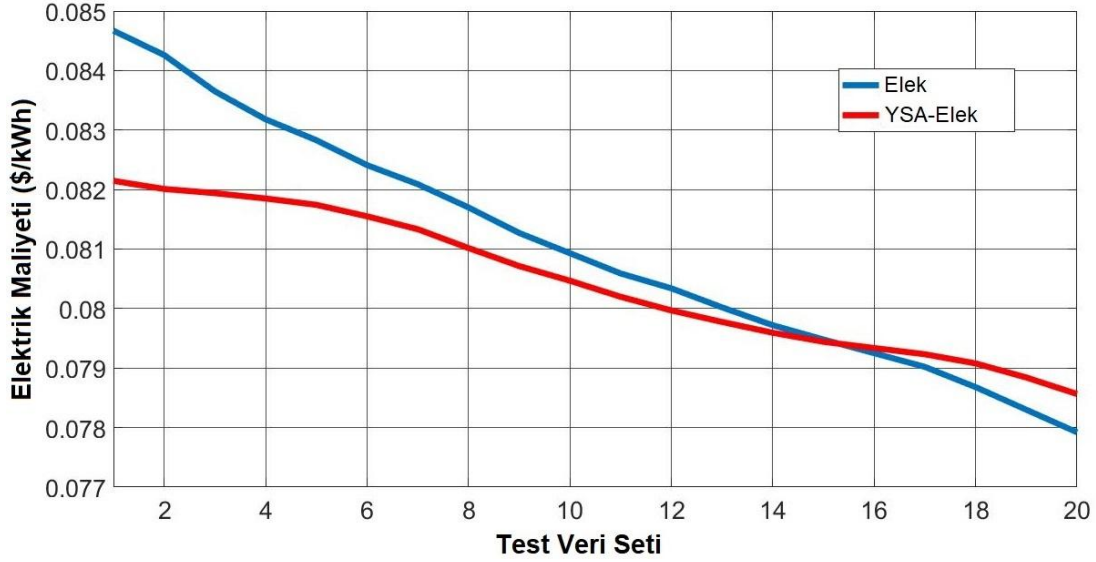
Şekil 4.44’de sistemin gerçek ısıtma kapasitesi ile YSA tahmin sonuçları gösterilmiştir. Sisteminin ısıtma kapasitesi için YSA tahmin sonucunun doğruluk seviyesi %99.9’dur. Bu, tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.44 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini ısıtma kapasitesinin değişimi.

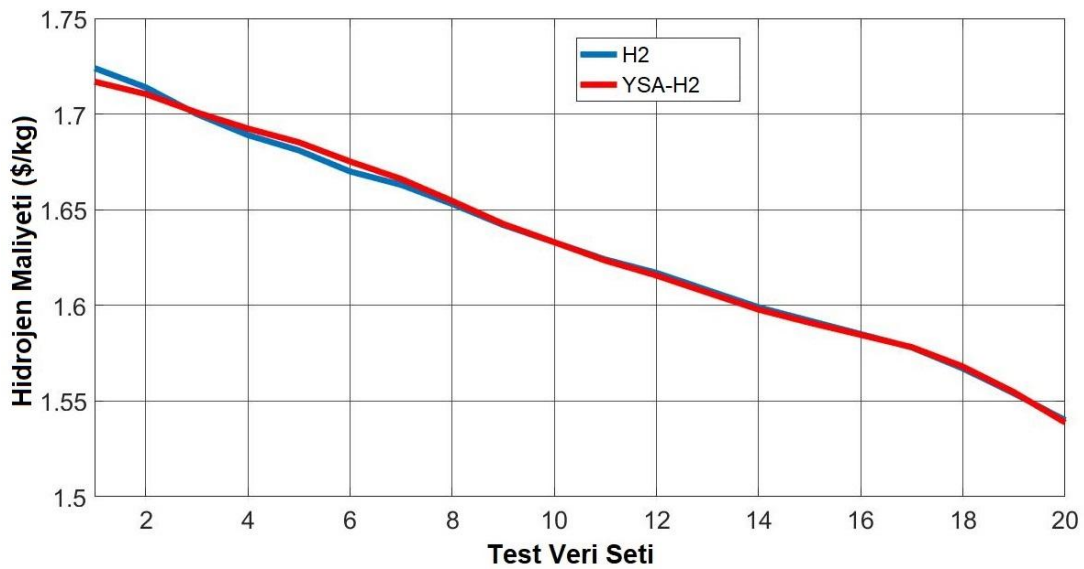
Gerçek elektrik maliyeti ile YSA tabanlı elektrik maliyeti tahmin sonuçları Şekil 4.25’de verilmiştir. YSA ile yapılan elektrik maliyeti tahminlerinin doğruluk seviyesi

%99.05 hesaplanmıştır. Bu sonuç, elektrik maliyeti için YSA tahminlerinin doğruluk seviyesinin oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.



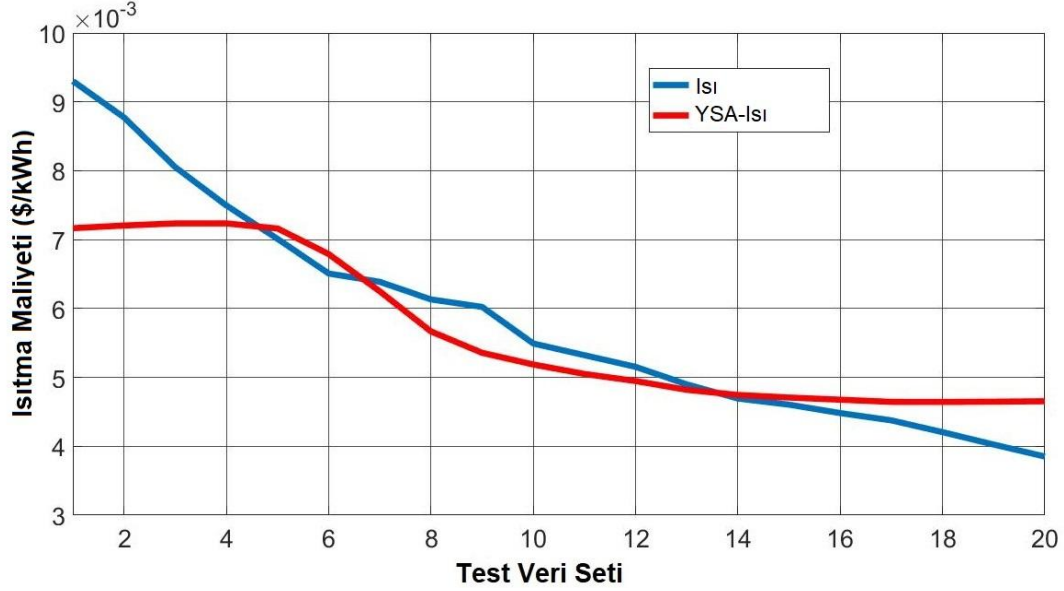
Şekil 4.45 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini elektrik maliyetinin değişimi.

Gerçek hidrojen maliyetinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.46'da gösterilmiştir. YSA ile yapılan hidrojen maliyeti tahminlerinin doğruluk seviyesi %99.8 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, YSA tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.46 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini hidrojen maliyetinin değişimi.

Gerçek ısıtma maliyetinin, YSA tabanlı tahmin sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.47’de gösterilmiştir. YSA ile yapılan ısıtma maliyeti tahminlerinin doğruluk seviyesi %92.5 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, YSA tahmin sonuçlarının güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



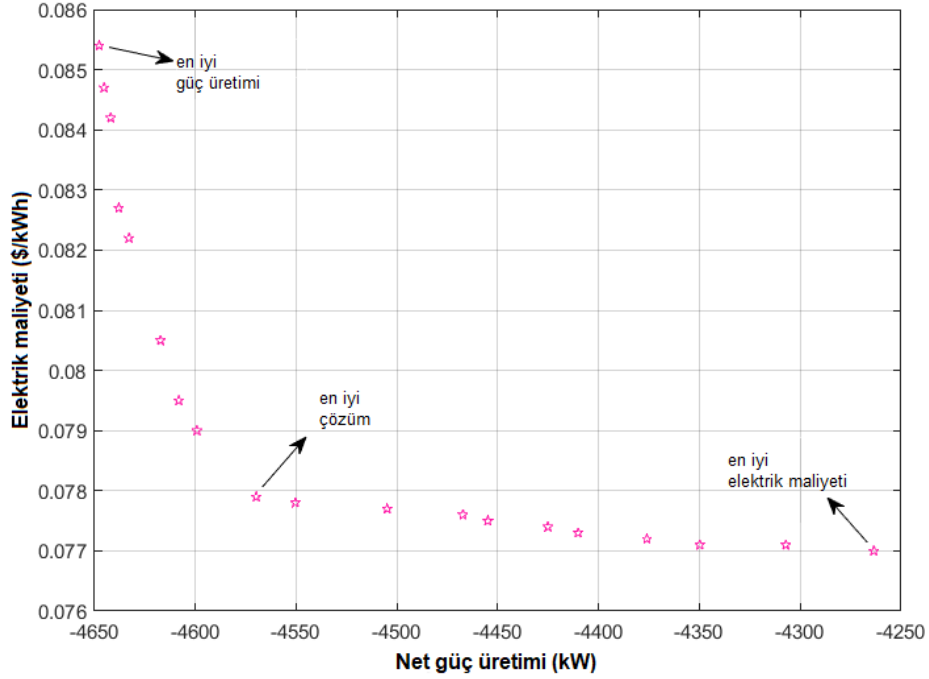
Şekil 4.47 Gerçek ve YSA tabanlı tahmini ısıtma maliyetinin değişimi.

4.4 Modellerin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları

4.4.1 Model 1’in Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları

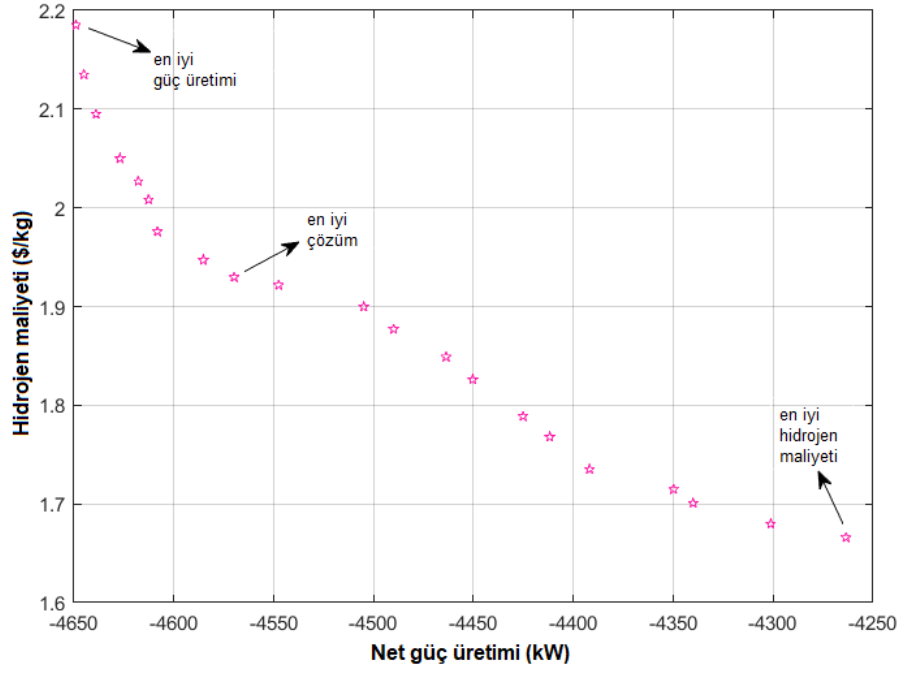
Ayar parametre değerlerinin MATLAB programına girilmesi ile birlikte genetik algoritma ile optimizasyon süreci başlatılır. İlk olarak rastgele seçilen bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Daha sonra genetik algoritma operatörleri belirlenerek yeni nesil popülasyon elde edilir. Mevcut ve yeni popülasyon birleştirilerek baskınlık sırasına ve kalabalık uzaklığına göre sıralanır. Optimizasyon sonucunda Pareto çözüm kümesi elde edilir. Aşağıda genetik algoritma yöntemi kullanılarak Pareto çözüm kümelerini gösteren bazı grafikler verilmiştir. Optimizasyon işleminin amacı, amaç fonksiyonlarının minimum veya maksimum değerlerini belirleyerek en iyi çözümü elde etmektir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen minimum ve maksimum değerler ile en iyi çözüm Pareto çözüm kümesi grafiklerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.48 net güç çıkışı ve birim elektrik maliyetine göre sistemin en iyi çözümünü göstermektedir. Şekil 4.48’de görüleceği üzere sistemin termodinamik ve ekonomik performansı arasında ters bir orantı vardır. Model 1 için maksimum güç çıktısı 4649 kW ve minimum elektrik maliyeti 0.0770 \$/kWh olarak bulunmuştur.



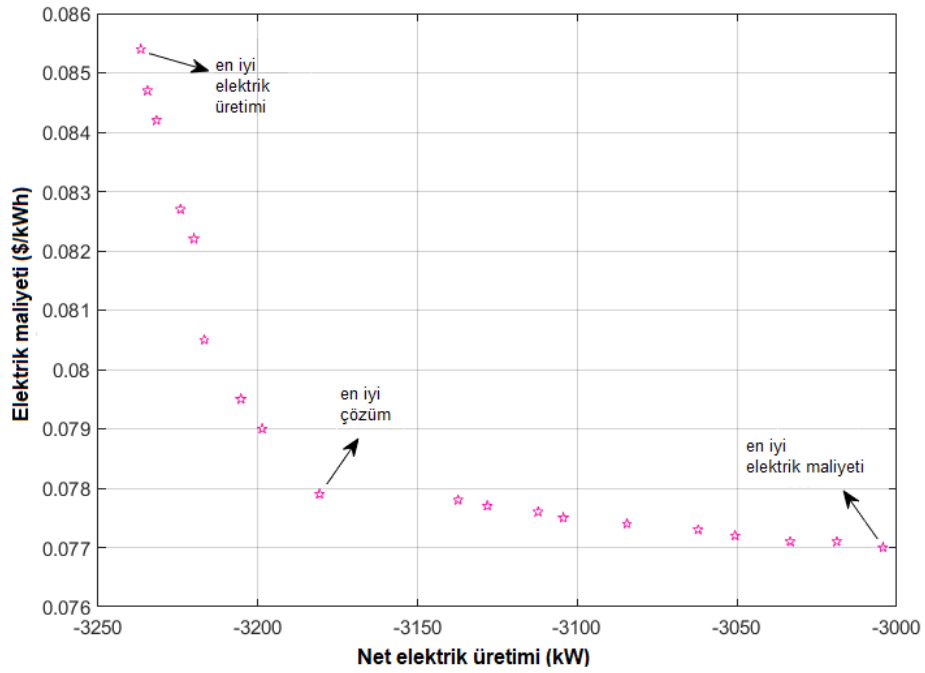
Şekil 4.48 Net güç çıkışı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.49’da sistemin net güç çıkışı ve birim hidrojen maliyetine göre optimizasyon çözümü gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin en maksimum güç çıktısı 4649 kW ve minimum hidrojen maliyeti 1.66 \$/kg’dır.



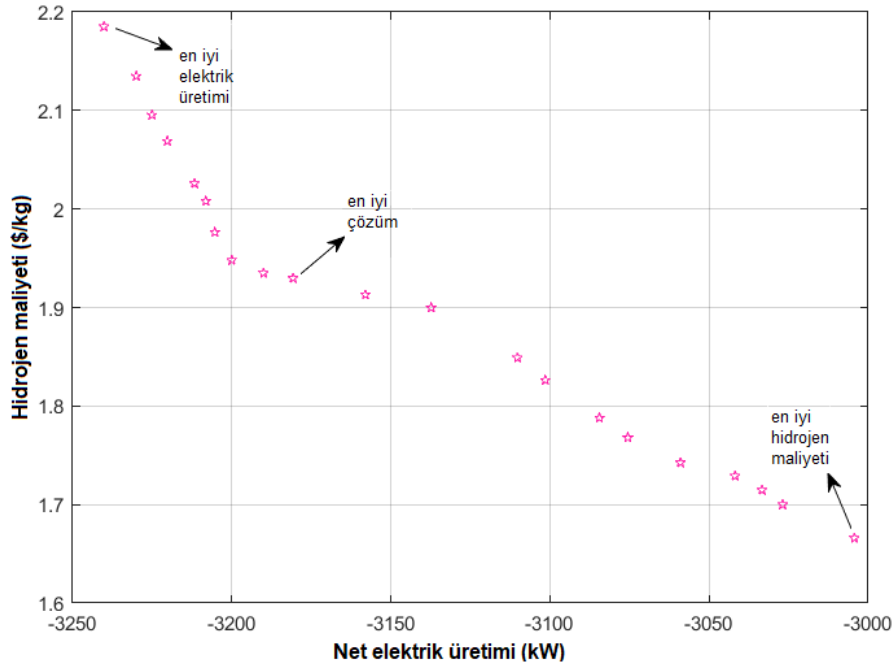
Şekil 4.49 Net güç çıktısı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarı ve birim elektrik maliyetine göre optimum çözüm Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Sistemde maksimum üretilen elektrik miktarı ve minimum birim elektrik maliyeti sırasıyla 3240 kW ve 0.0770 \$/kWh’dir.



Şekil 4.50 Net elektrik miktarı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.51’de yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarı ve birim hidrojen maliyetine göre optimum çözüm gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemden üretilen maksimum elektrik miktarı 3240 kW ve minimum hidrojen maliyeti 1.66 \$/kg hesaplanmıştır.



Şekil 4.51 Net elektrik miktarı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Model 1 için genetik algoritma yöntemi ile optimizasyon sonucunda elde edilen optimum karar parametreleri Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.26 Model 1 için karar parametrelerinin optimum değerleri.

Karar parametreleri	Optimum değer
Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	19.92
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	149.96
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	97.12
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	969.63
Alçak basınç P_1 (kPa)	450
Yüksek basınç P_3 (kPa)	2000

Çizelge 4.26 (Devam)

TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	0.2
TVP -1 akışkanın kollektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	60
Alçak basınç P_{10} (kPa)	10
Yüksek basınç P_{11} (kPa)	2000
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	10
Pompa izentropik verimi η_p	0.85
Türbin izentropik verimi η_T	0.85

Model 1 için termodinamik ve termoekonomik analiz sonucunda elde edilen değerler ile genetik algoritma yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen değerler ve bu değerler arasındaki değişim Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27 Model 1 için genetik algoritma optimizasyonu sonuçları.

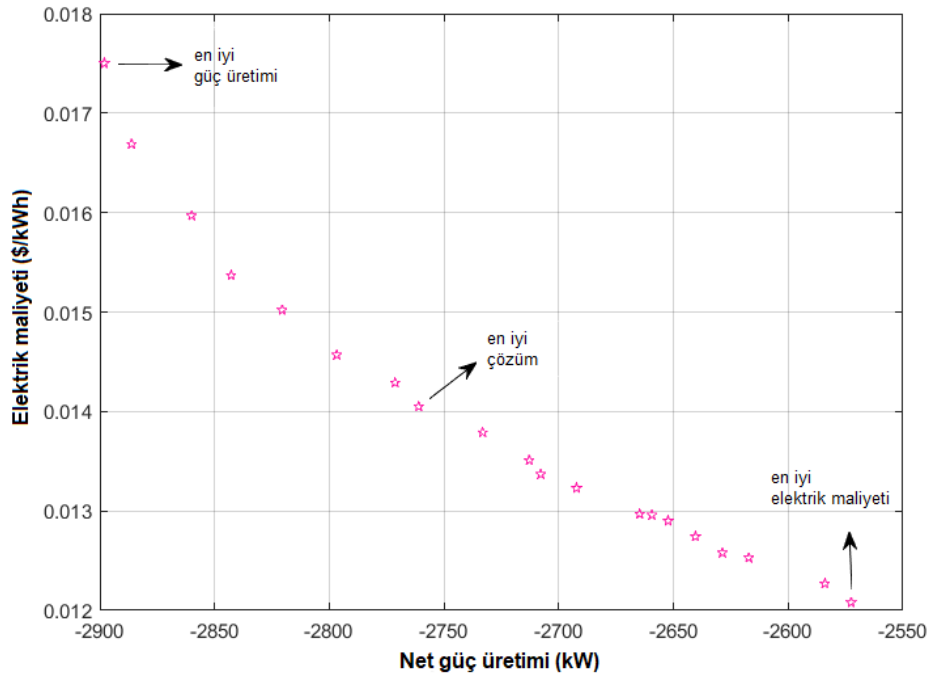
Özellikler	Tasarım değeri	Optimum çözüm	Değişim (%)
\dot{W}_{net} (kW)	2900	4569	+57.58
\dot{W}_{FC} (kW)	2000	3180	+59.03
\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	0.105	0.077	-25.71
\dot{C}_{H_2} (\$/kg)	2.376	1.921	-19.14

Genetik algoritma yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda sistemin termodinamik performansında önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. Sistemin net güç çıkışı 2900 kW’dan 4569 kW’a, üretilen elektrik miktarı 2000 kW’dan 3180 kW’a yükselmiştir. Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sonucunda sistemin ekonomik performansında da bir iyileştirme olmuştur. Üretilen elektriğin birim maliyeti %25.71 ve üretilen hidrojenin birim maliyeti %19.14 oranında azaltılarak optimize edilmiştir.

4.4.2 Model 2'nin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları

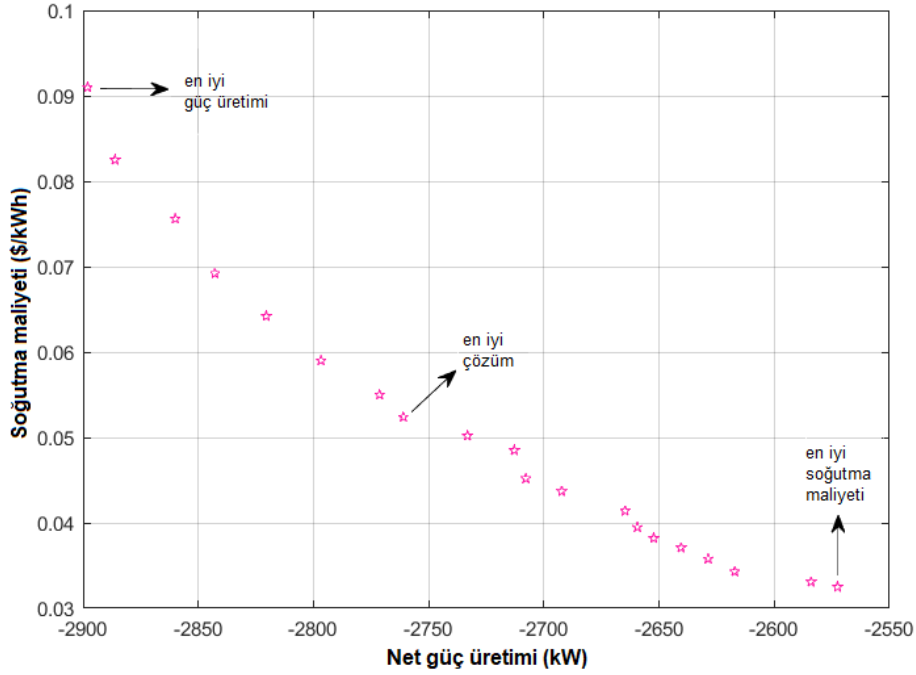
Ayar parametre değerlerinin programa girilmesi ile birlikte genetik algoritma ile optimizasyon süreci başlatılır. İlk olarak rastgele seçilen bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Daha sonra genetik algoritma operatörleri belirlenerek yeni nesil popülasyon elde edilir. Mevcut ve yeni popülasyon birleştirilerek baskınlık sırasına ve kalabalık uzaklığına göre sıralanır. Optimizasyon sonucunda Pareto çözüm kümesi elde edilir. Aşağıda genetik algoritma yöntemi kullanılarak Pareto çözüm kümelerini gösteren bazı grafikler verilmiştir. Optimizasyon işleminin amacı, amaç fonksiyonlarının minimum veya maksimum değerlerini belirleyerek en iyi çözümü elde etmektir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen minimum ve maksimum değerler ile en iyi çözüm, Pareto çözüm kümesi grafiklerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.52 net güç çıktısı ve birim elektrik maliyetine göre sistemin optimum çözümünü göstermektedir. Şekil 4.52'de görüleceği üzere sistemin termodinamik ve ekonomik performansı arasında ters bir orantı vardır. Sistemin maksimum güç çıktısı 2898 kW ve minimum birim elektrik maliyeti ise 0.0121 \$/kWh olarak bulunmuştur.



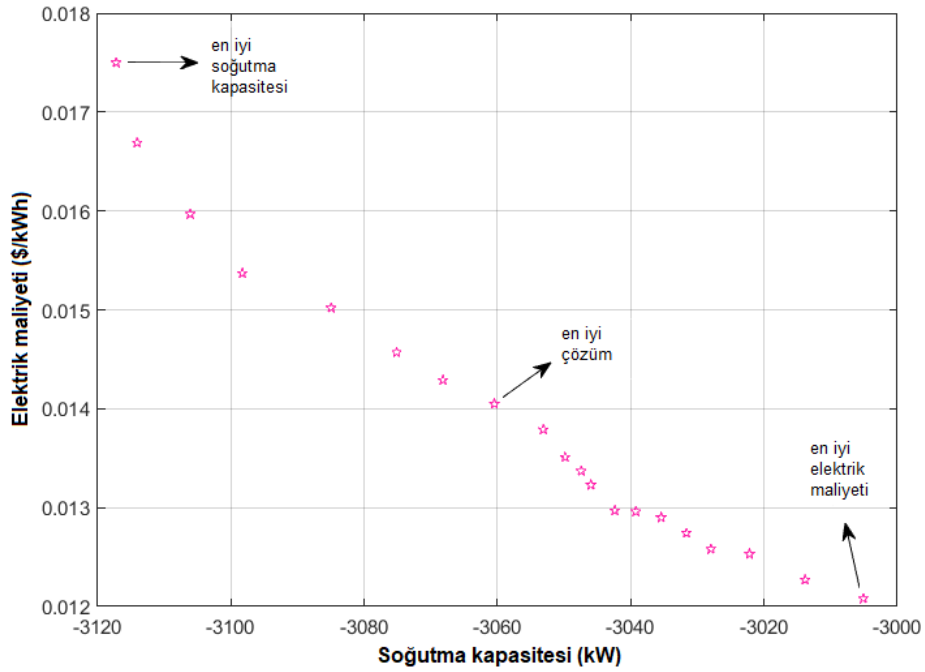
Şekil 4.52 Net güç çıktısı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.53’de sistemin net güç çıktısı ve birim soğutma maliyetine göre optimum çözümü gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin maksimum güç çıktısı 2898 kW ve minimum birim soğutma maliyeti 0.0325 \$/kWh olmuştur.



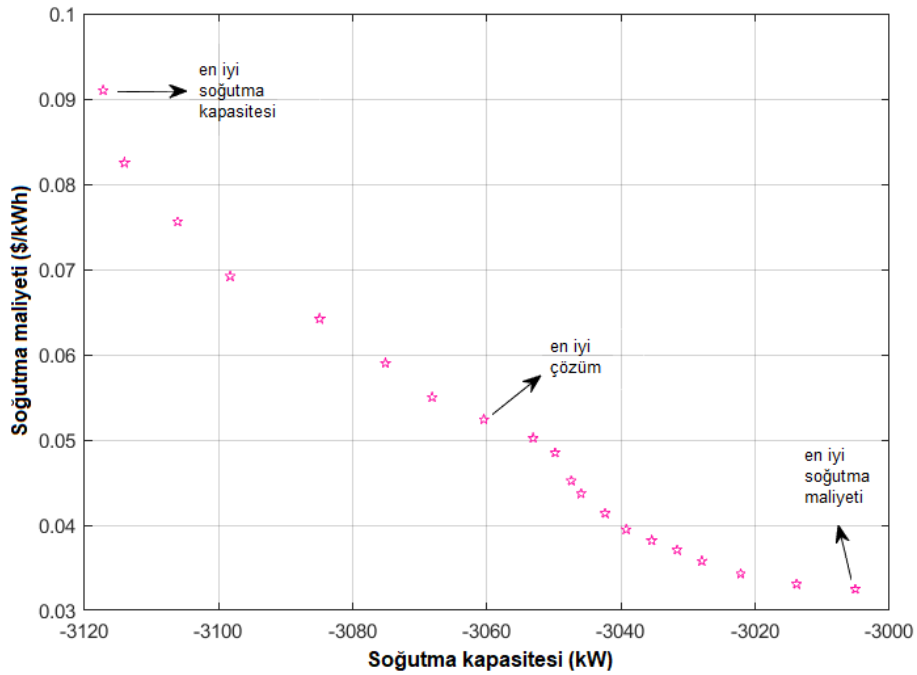
Şekil 4.53 Net güç çıktısı ve soğutma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Absorpsiyonlu soğutma çevriminin soğutma kapasitesi ve birim elektrik maliyetine göre optimum çözümü Şekil 4.54’de gösterilmiştir. Elde edilen maksimum soğutma kapasitesi ve minimum birim elektrik maliyeti sırasıyla 3117 kW ve 0.0121 \$/kWh’dir.



Şekil 4.54 Soğutma kapasitesi ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.55’de absorpsiyonlu soğutma çevriminin soğutma kapasitesi ve birim soğutma maliyetine göre optimum çözümü gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin maksimum soğutma kapasitesi 3117 kW ve minimum birim soğutma maliyeti 0.0325 \$/kWh olmuştur.



Şekil 4.55 Soğutma kapasitesi ve soğutma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Model 2 için sistemin genetik algoritma yöntemi ile optimizasyon sonucunda elde edilen optimum karar parametreleri Çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28 Model 2 için karar parametrelerinin optimum değerleri.

Karar parametreleri	Optimum değer
Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	26.22
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	134.61
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	96.93
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	981.59
TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	0.2
TVP -1 akışkanın kollektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	60
Fakir Çözelti konsantrasyonu x (Li-Br/kg)	0.5322
Zengin Çözelti konsantrasyonu x (Li-Br/kg)	0.6711
Alçak basınç P_{12} (kPa)	0.8
Yüksek basınç P_{13} (kPa)	10
Evaporatör su giriş sıcaklığı T_{22} (°C)	20
Çözelti ısı değiştirici çıkış sıcaklığı T_{14} (°C)	75
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	10
Pompa izentropik verimi η_P	0.85
Türbin izentropik verimi η_T	0.85
Alçak basınç P_1 (kPa)	700
Yüksek basınç P_3 (kPa)	3000

Model 2’nin termodinamik ve termoeconomik analiz sonucunda elde edilen değerleri ile genetik algoritma yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen değerleri ve bu değerler arasındaki değişim Çizelge 4.29’da verilmiştir.

Çizelge 4.29 Model 2 için genetik algoritma ile optimizasyon sonuçları.

Özellikler	Tasarım değeri	Optimum çözüm	Değişim (%)
\dot{W}_{net} (kW)	2235	2761	+23.53
\dot{Q}_{eva} (kW)	2720	3061	+12.53
\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	0.016	0.014	-12.15
\dot{C}_{cool} (\$/kWh)	0.074	0.052	-29.72

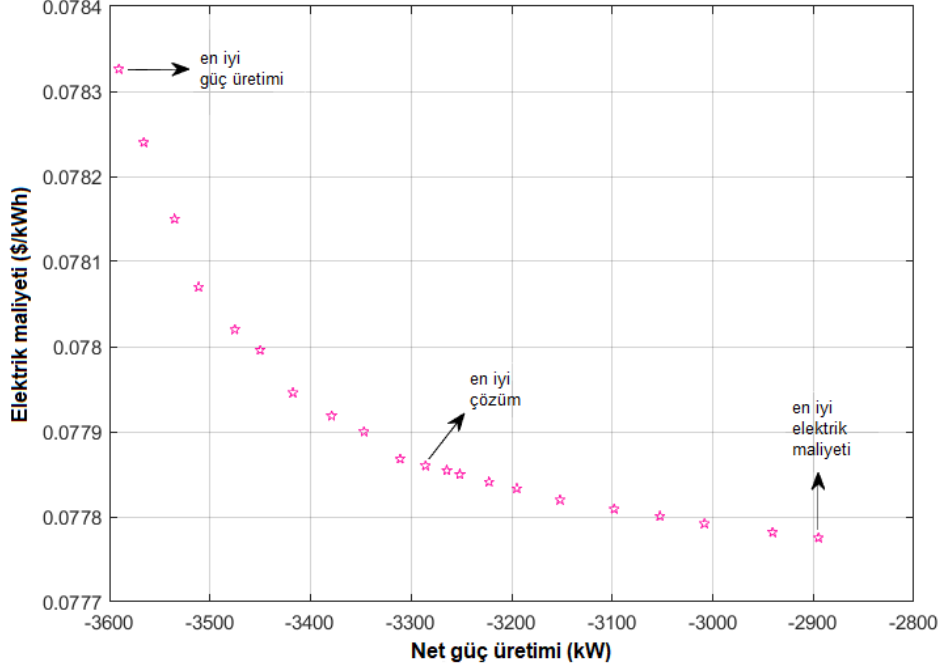
MATLAB programında genetik algoritma yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda sistemin termodinamik performansında önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. Sistemin net güç çıkışı 2235 kW'dan 2761 kW'a, soğutma kapasitesi 2720 kW'dan 3061 kW'a yükselmiştir. Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sonucunda sistemin ekonomik performansında da bir iyileştirme olmuştur. Üretilen elektriğin birim maliyeti %12.15 ve yapılan soğutmanın birim maliyeti %29.72 oranında azaltılarak optimize edilmiştir.

4.4.3 Model 3'ün Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyon Sonuçları

Ayar parametre değerlerinin programa girilmesi ile birlikte genetik algoritma ile optimizasyon süreci başlatılır. İlk olarak rastgele seçilen bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Daha sonra genetik algoritma operatörleri belirlenerek yeni nesil popülasyon elde edilir. Mevcut ve yeni popülasyon birleştirilerek baskınlık sırasına ve kalabalık uzaklığına göre sıralanır. Optimizasyon sonucunda Pareto çözüm kümesi elde edilir. Aşağıda genetik algoritma yöntemi kullanılarak Pareto çözüm kümelerini gösteren bazı grafikler verilmiştir. Optimizasyon işleminin amacı, amaç fonksiyonlarının minimum veya maksimum değerlerini belirleyerek en iyi çözümü elde etmektir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen minimum ve maksimum değerler ile en iyi çözüm Pareto çözüm kümesi grafiklerinde gösterilmiştir.

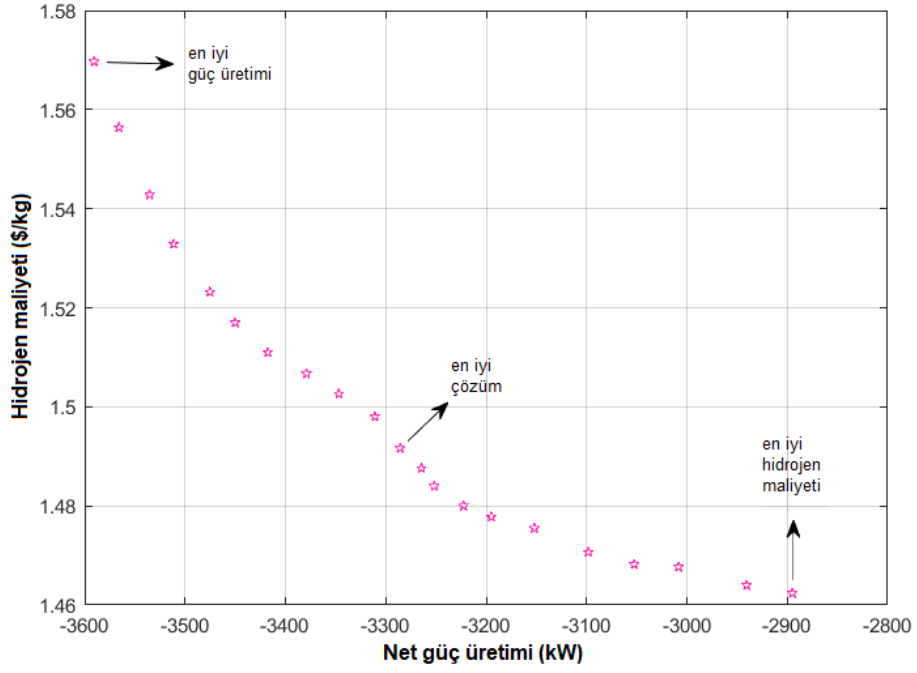
Şekil 4.56 net güç çıktısı ve birim elektrik maliyetine göre sistemin optimum çözümünü göstermektedir. Şekil 4.56'da görüleceği üzere sistemin termodinamik ve ekonomik

performansı arasında ters bir orantı vardır. Sistemin maksimum güç çıktısı 3590 kW ve minimum birim elektrik maliyeti ise 0.0777 \$/kWh olarak bulunmuştur.



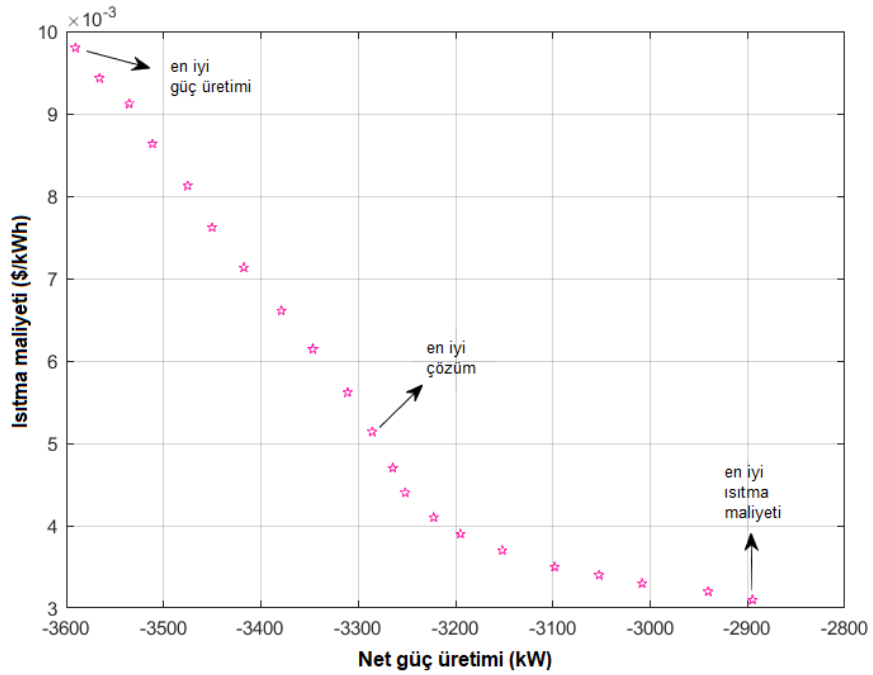
Şekil 4.56 Net güç çıktısı ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.57’de sistemin net güç çıktısı ve birim hidrojen maliyeti optimizasyon çözümü gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin maksimum güç çıktısı 3590 kW ve minimum birim hidrojen maliyeti 1.46 \$/kg olmuştur.



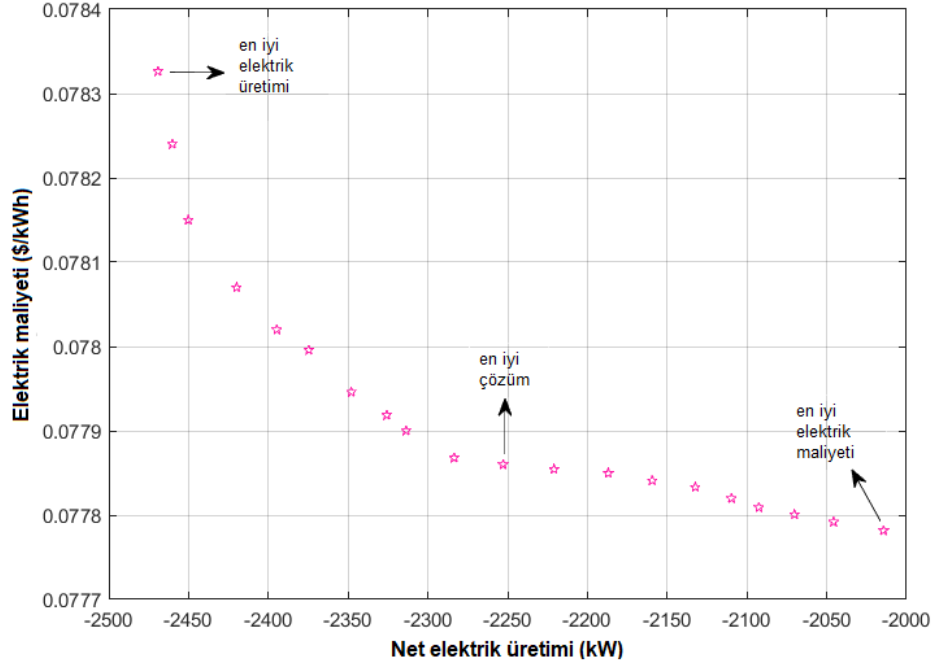
Şekil 4.57 Net güç çıktısı ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.58 net güç çıktısı ve birim ısıtma maliyetine göre sistemin optimum çözümünü göstermektedir. Sistemin maksimum güç çıktısı 3590 kW ve minimum birim ısıtma maliyeti 0.0031 \$/kWh olarak bulunmuştur.



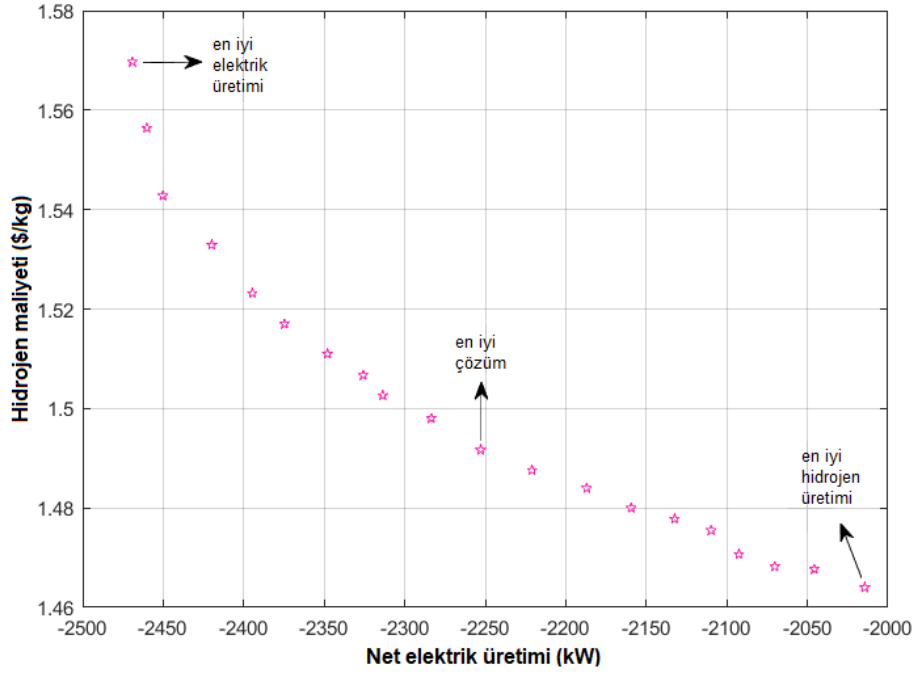
Şekil 4.58 Net güç çıktısı ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarı ve birim elektrik maliyetine göre optimum çözüm Şekil 4.59’da gösterilmiştir. Sistemde maksimum üretilen elektrik miktarı ve minimum birim elektrik maliyeti sırasıyla 2469 kW ve 0.0777 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.



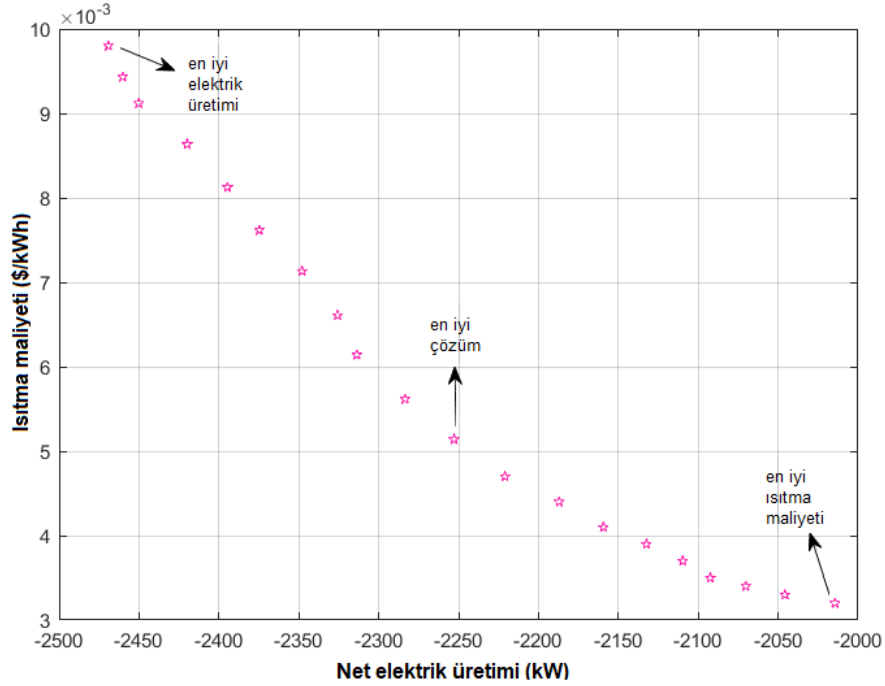
Şekil 4.59 Net elektrik ve elektrik maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Şekil 4.60’da yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarı ve birim hidrojen maliyetine göre optimum çözüm gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin maksimum üretilen elektrik miktarı 2469 kW ve minimum birim hidrojen maliyeti 1.46 \$/kg’dır.



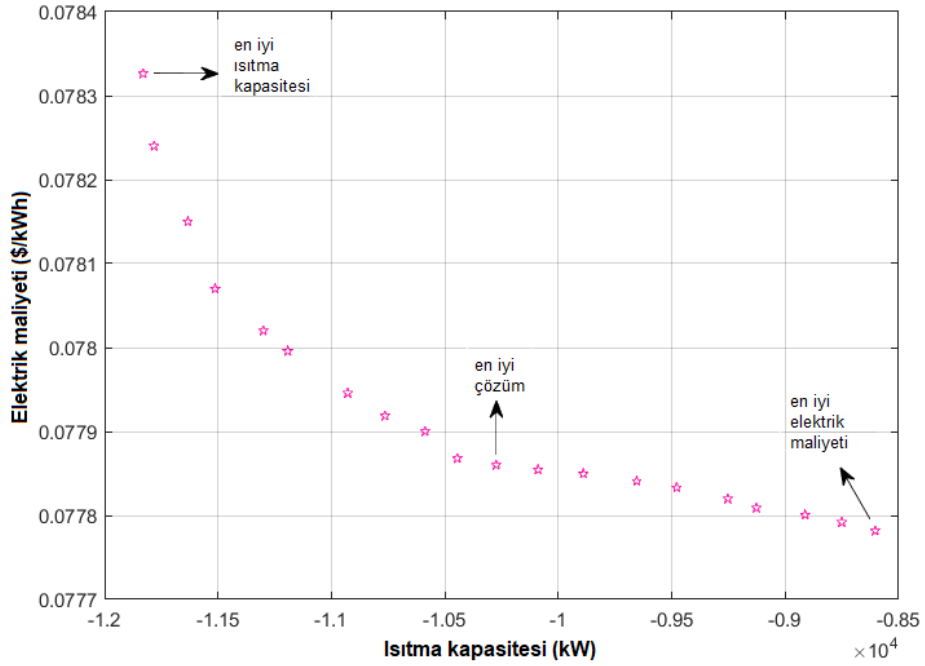
Şekil 4.60 Net elektrik ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Yakıt hücresinde üretilen elektrik miktarı ve birim ısıtma maliyetine göre optimum çözüm Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Sistemde maksimum üretilen elektrik miktarı ve minimum birim ısıtma maliyeti sırasıyla 2469 kW ve 0.0031 \$/kWh olmuştur.



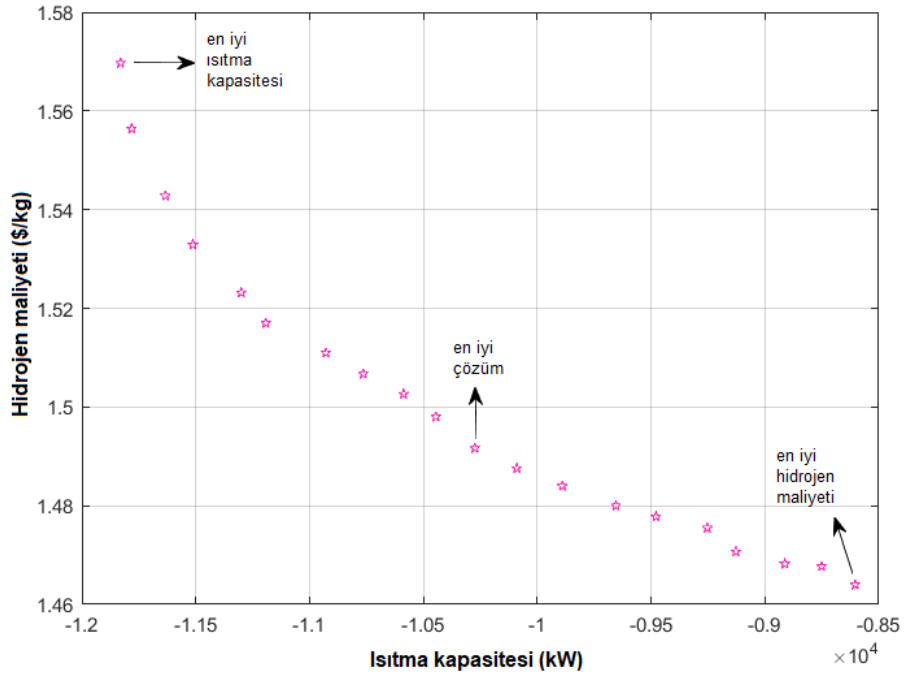
Şekil 4.61 Net elektrik ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Mahal ısıtma için kullanılan ısı değiştiricisinin ısıtma kapasitesi ve birim elektrik maliyetine göre optimum zm Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Sistemden elde edilen maksimum ısıtma kapasitesi ve minimum birim elektrik maliyeti sırasıyla 11,830 kW ve 0.0777 \$/kWh hesaplanmıştır.



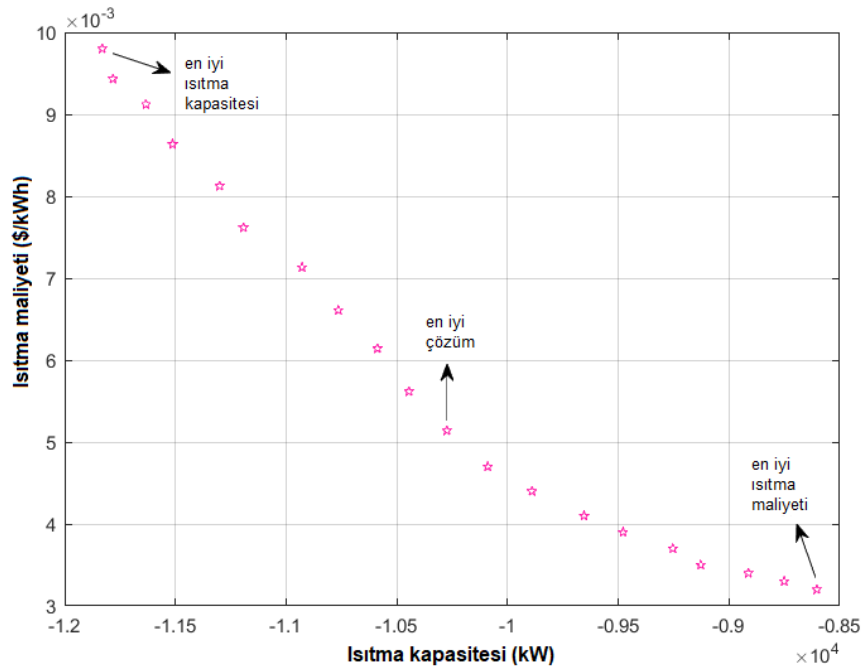
Şekil 4.62 Isıtma kapasitesi ve elektrik maliyetinin Pareto zm kümesi.

Şekil 4.63’de sistemin ısıtma kapasitesi ve birim hidrojen maliyetine göre optimum çözümü gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda sistemin maksimum ısıtma kapasitesi 11,830 kW ve minimum birim hidrojen maliyeti 1.46 \$/kg olmaktadır.



Şekil 4.63 Isıtma kapasitesi ve hidrojen maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Mahal ısıtma için kullanılan ısı değiştiricisinin ısıtma kapasitesi ve birim ısıtma maliyetine göre optimum çözüm Şekil 4.64'de gösterilmiştir. Sistemden elde edilen maksimum ısıtma kapasitesi ve minimum birim ısıtma maliyeti sırasıyla 11,830 kW ve 0.0031 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.64 Isıtma kapasitesi ve ısıtma maliyetinin Pareto çözüm kümesi.

Model 3 için sistemin genetik algoritma yöntemi ile optimizasyon sonucunda elde edilen optimum karar parametreleri Çizelge 4.30’da verilmiştir

Çizelge 4.30 Model 3 için karar parametrelerinin optimum değerleri.

Karar parametreleri	Optimum değer
Çevre sıcaklığı T_0 (°C)	22.19
Jeotermal kaynak sıcaklığı T_{geo} (°C)	148.92
Jeotermal akışkan kütleli debisi \dot{m}_{geo} (kg/s)	97.42
Güneş ışınım şiddeti G (W/m ²)	960.13
TVP-1 akışkanın kütleli debisi \dot{m}_{HTF} (kg/s)	0.2
TVP -1 akışkanın kollektöre giriş sıcaklığı T_{in} (°C)	60
Alçak basınç P_1 (kPa)	700
Yüksek basınç P_3 (kPa)	3500
Pinc sıcaklık farkı ΔT_{pp} (°C)	10
Pompa izentropik verimi η_P	0.85
Türbin izentropik verimi η_T	0.85

Model 3’ün termodinamik ve termoekonomik analiz sonucunda elde edilen değerleri ile genetik algoritma yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen değerleri ve bu değerler arasındaki değişim Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31 Model 3 için genetik algoritma ile optimizasyon sonuçları.

Özellikler	Tasarım değeri	Optimum çözüm	Değişim (%)
\dot{W}_{net} (kW)	2420	3285	+35.74
\dot{W}_{FC} (kW)	1670	2252	+34.85
\dot{Q}_{hex} (kW)	8933	10,274	+15.01
\dot{C}_{elec} (\$/kWh)	0.080	0.0778	-2.68
\dot{C}_{H_2} (\$/kg)	1.629	1.491	-8.43
\dot{C}_{heat} (\$/kWh)	0.007	0.005	-27.14

Genetik algoritma yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda sistemin termodinamik performansında önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. Sistemin net güç çıkışı 2420 kW'dan 3285 kW'a, üretilen elektrik miktarı 1670 kW'dan 2252 kW'a ve ısıtma kapasitesi 8933 kW'dan 10,274 kW'a yükselmiştir. Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sonucunda sistemin ekonomik performansında da bir iyileştirme olmuştur. Üretilen elektriğin birim maliyeti %2.68, üretilen hidrojenin birim maliyeti %8.43 ve yapılan ısıtmanın birim maliyeti %27.14 oranında azaltılarak optimize edilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan tez kapsamında jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi ile birlikte ısıtma ve soğutma yapılması için kojenerasyon içeren prosesler ile enerjinin farklı formlara dönüştürülmesi ele alınmış ve üç farklı model geliştirilmiştir. İhtiyaç fazlası zamanlarda üretilen enerjiden, hidrojen üretilerek elektriğin depolanması sağlanmıştır. Suyun elektrolizi yöntemi kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Elektroliz işlemi için gerekli olan elektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olan jeotermal ve güneş enerjisi tarafından sağlanmıştır. Elektriğe ihtiyaç olduğu zamanlarda depolanan hidrojen enerjisi, yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülmüş ve kullanımı sağlanmıştır.

Termodinamik ve termoekonomik analizleri yapılan modellerin YSA yöntemi kullanılarak güç ve maliyet tahminleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ardından Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak sistemlerin optimizasyon çalışmaları yapılarak, sistemlerin en iyi şekilde çalışmasını sağlayacak optimum çalışma şartları elde edilmiştir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek bazı sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ORC çevrimi her bir modelde düşünülen sistem için kullanılmıştır. Su elektroliz ünitesi aracılığıyla bir hidrojen üretim sistemi ve hidrojen enerjisi dönüşümü için bir yakıt hücresi Model 1 ve Model 3'ün bir parçasıdır.
- Model 1 jeotermal ve güneş enerji santrallerinden gelen elektrik enerjisi ile konutların elektrik ihtiyacının karşılanabileceğini, ihtiyacın az olduğu zamanlarda ise hidrojen üretimi yapılarak hidrojenin depolanabileceğini,

tekrardan ihtiyacın olduğu zamanlarda ise depolanan hidrojenin yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülerek ihtiyacın karşılanabileceğini göstermiştir.

- Model 2’de mahal soğutma için düşünülen absorpsiyonlu soğutma çevrimi, ORC çevrimi ile başarılı bir şekilde uyum göstermiştir. Bu model bir sistemde hem güç üretiminin hem de mahal soğutmanın entegre olarak yapılabileceğinin teknik açıdan ve maliyet açısından mümkün olduğunu ispatlamıştır.
- Model 3 bir çevrim sonucunda belli bir seviyede enerjiye sahip ısı enerjisinin atık ısı olarak çevrimden atılmamasının tam aksine bu ısı enerjisinden mahal ısıtma gibi bir işlem için faydalanılabileceğini göstermiştir. Böylece sistemde yüksek enerjiye sahip ısı enerjisi ile aynı anda güç üretimi ve mahal ısıtma işlemi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
- Modellerin termodinamik ve termoekeonomik analiz sonuçlarının YSA yöntemi kullanılarak yüksek hassasiyetle tahmin edilebileceği kanıtlanmıştır. YSA tabanlı sistem modellemesi yapılarak gerçek zamanlı uygulamaların gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.
- Modeller üzerinde Genetik Algoritma yöntemi ile yapılan optimizasyon işlemi sonucunda, mühendislik enerji uygulama sistemlerinin fizibilite ve tasarım aşamaları için optimizasyon işleminin çok önemli bir araç olduğu gösterilmiştir.
- Çalışmanın sonuçları sürdürülebilir enerji talebini geliştirmek için olduğu kadar, farklı enerji kaynaklarının ve sıcaklıklarının enerji ve ekserji maliyetleri üzerindeki değişimleri ile ilgilenen araştırmacılar için de çok faydalı olacaktır.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizin enerji ekonomisi geleceğinde sürdürülebilir enerji üretimini sağlamak adına önemli bir potansiyele sahip olduğu Afyonkarahisar ili uygulamasıyla gösterilmiştir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanlarının genişletilmesi ve bu alanda daha fazla yatırım yapılması için yatırımcılara gerekli destekler sağlanmasında rehberlik edebilecek bir fizibilite raporu niteliğinde örneklemeler sunulmuştur.
- Hidrojenin çevreye zarar vermeyen temiz bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olarak tüm faydaları göz önüne alınarak, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretiminin yapılmasının teknik ve ekonomik olarak teşvik edilebilir olduğu ortaya konmuştur.

- Gelecekte hidrojen enerjisinin üretim ve dönüşüm teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bir enerji ekonomisi uygulamasında hidrojen enerjisinin maliyeti, enerji maliyetleri ile rekabet edecek seviyeye ulaşacaktır.
- Jeotermal ve Güneş enerjisi, son yıllarda Türkiye’de en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinin başında gelmektedir. Ülkemiz yenilenebilir enerji teknolojisi alanında yapacağı doğru planlama ve atacağı adımlarla, yakın gelecekte dünyada oldukça rekabetçi bir konuma ulaşacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Acar M S, Arslan O, 2019, Energy And Exergy Analysis of Solar Energy-Integrated, Geothermal Energy-Powered Organic Rankine Cycle, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 659-666.
- Akdemir Ö, Güngör A, 2001, Absorbsiyonlu Soğutma Sistemleri; Verimlerini Artırmak İçin Geliştirilen Çevrimler, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 3-6 Ekim, İzmir, 99-102.
- Akrami E, Chitsaz A, Ghamari P, Mahmoudi S M S, 2017, Energy and Exergy Evaluation of A Tri-Generation System Driven by The Geothermal Energy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, 401-408.
- Altun A F, Kilic M, 2020, Thermodynamic Performance Evaluation of A Geothermal ORC Power Plant, *Renewable Energy*, 148, 261-274.
- Anderson D, McNeill G, 1992, *Artificial Neural Networks Technology*, Kaman Sciences Corporation, 258, 1-83.
- Andrews J, Shabani B, 2012, Dimensionless Analysis of The Global Techno-Economic Feasibility of Solar-Hydrogen Systems for Constant Year-Round Power Supply, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 6-18.
- Aspen PlusV8.4., 2015, *Engineering Economic Analysis Library*.
- Ataseven B, 2013, Yapay Sinir Ağları ile Öngörü Modellemesi, *Öneri Dergisi*, 10, 101-115.
- Ayub M, Mitsos A, Ghasemi H, 2015, Thermo-Economic Analysis of A Hybrid Solar-Binary Geothermal Power Plant, *Energy*, 87, 326-335.
- Bataineh K, Taamneh Y, 2017, Performance Analysis of Stand-Alone Solar Dish Stirling System for Electricity Generation, *International Journal of Heat and Technology*, 35, 498-508.
- Beasley D, Bull D R, Martin R R, 1993, An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, *Fundamentals*, *University Computing*, 152, 56-69.

- Behzadi A, Gholamian E, Ahmadi P, Habibollahzade A, Ashjaee M, 2018, Energy, Exergy and Exergoeconomic (3E) Analyses and Multi-Objective Optimization of A Solar And Geothermal Based Integrated Energy System, Applied Thermal Engineering, 143, 1011-1022.
- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M, 1996, Thermal Design and Optimization, John Wiley & Sons , 560p, New York.
- Bellos E, Tzivanidis C, 2017, A Detailed Exergetic Analysis of Parabolic Trough Collectors, Energy Conversion and Management, 149, 275-292.
- Bulut H, Büyükalaca O, Yılmaz T, 2002, New Outdoor Cooling Design Data for Turkey, Energy, 27, 923-946.
- Cabrera F J, Fernández-García A Silva, R M P, Pérez-García M, 2013, Use of Parabolic Trough Solar Collectors for Solar Refrigeration and Air-Conditioning Applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 103-118.
- Cardemil J, Gangas M, Sarmiento C, Escobar R, 2018, Thermoeconomic Assessment of Solar-Geothermal Hybrid Plants, In AIP Conference Proceedings, 2033, 1-9.
- Cengel Y, 2014, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill Higher Education, 968p, New York.
- Cengel Y, Boles M A, 2015, Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw-Hill Science, 996p, New York.
- Delgado-Torres A M, García-Rodríguez L, 2010, Analysis and Optimization of The Low-Temperature Solar Organic Rankine Cycle (ORC), Energy Conversion and Management, 51, 2846-2856.
- Dhillon B S, 2009, Life Cycle Costing for Engineers, Crc Press, 224p, New York.
- Dieckmann S, Dersch J, Giuliano S, Puppe M, Lüpfer E, Hennecke K, 2017, LCOE Reduction Potential of Parabolic Trough and Solar Tower CSP Technology Until 2025, In AIP Conference Proceedings, 1850, 1-8.
- Divisek J, 1990, Water Electrolysis in Low- and Medium-Temperature Regime, Electrochemical Hydrogen Technologies-Electrochemical Production and Combustion of Hydrogen, Elsevier, 212p, Oxford.

- Dombaycı Ö A, 2009, Degree-Days Maps of Turkey for Various Base Temperatures, Energy, 34, 1807-1812.
- Eisavi B, Khalilarya S, Chitsaz A, Rosen M A, 2018, Thermodynamic Analysis of A Novel Combined Cooling, Heating and Power System Driven by Solar Energy, Applied Thermal Engineering, 129, 1219-1229.
- El-Emam R S, Dincer I, 2018, Investigation and Assessment of A Novel Solar-Driven Integrated Energy System, Energy Conversion and Management, 158, 246-255.
- Enerji ve Çevre Dergisi, 2017, Jeotermal Enerjide Organik Rankine Çevrimi, 132, 42-44.
- Engineering Equation Solver, 2021, In: F-Chart Software.
- Erdener H, Erkan E, Gür N, Şengül E, Baç N, 2007, Sürdürülebilir Enerji ve Hidrojen, ODTÜ yayıncılık, 112s, Ankara.
- Ergün A, Ahmet N, Erdoğan E, Koç G A, Özkan S, 2016, Binary Santrallerde Çalışma Akışkanı Olarak Kullanılan N-Pentan'ın Patlama Riskinin İncelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 68-685.
- Frank K, Goswami D Y, 2007, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, CRC Press, 1624p, Flo Rida.
- Herold K E, Radermacher R, Klein S A, 2016, Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, 392p, Flo Rida.
- Hocaoğlu F O, 2011, Stochastic Approach for Daily Solar Radiation Modeling, Solar Energy, 85, 278-287.
- Kalogirou S. A, 2013, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Academic Press, 840p, Oxford.
- Kanoğlu M, 2005, Jeotermal Elektrik Üretim Sistemleri ve Kojenerasyon, Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 23-26 Kasım, İzmir, 289-299.
- Kanoğlu M, Bolattürk A, 2008, Performance and Parametric Investigation of A Binary Geothermal Power Plant by Exergy, Renewable Energy, 33, 2366-2374.
- Kanoğlu M, Çengel Y A, Cimbala J M, 2020, Fundamentals and Applications of Renewable Energy, McGraw-Hill Education, 416p, New York.

- Karapekmez A, Dincer I, 2020, Thermodynamic Analysis of A Novel Solar and Geothermal Based Combined Energy System for Hydrogen Production, International Journal of Hydrogen Energy, 45, 5608-5628.
- Karatairi E, Ambrosini A, 2018, Improving The Efficiency of Concentrating Solar Power Systems, MRS Bulletin, 43, 920-921.
- Kaya S, Fığlalı N, 2016, Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinde Pareto Optimal Kullanımı, Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi, 5, 9-18.
- Keskenler M F, Keskenler E F, 2017 Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi, Takvim-i Vekayi, 5, 8-18.
- Khalid F, Dincer I, Rosen M A, 2017, Techno-Economic Assessment of A Solar-Geothermal Multigeneration System for Buildings, International Journal of Hydrogen Energy, 42, 21454-21462.
- Koyuncu İ, Yılmaz C, Alçın M, Tuna M, 2019, Artificial Neural Network Optimization of A Geothermal Energy Assisted Hydrogen Generation Economy, 4th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, 24-28 April, Kiev, 360-364.
- Koyuncu I, Yılmaz C, Alcin M, Tuna M, 2020, Design and Implementation of Hydrogen Economy Using Artificial Neural Network on Field Programmable Gate Array, International Journal of Hydrogen Energy, 45, 20709-20720.
- Kwon Y H, Kwak H Y, Oh S D, 2001, Exergoeconomic Analysis of Gas Turbine Cogeneration Systems, International Journal of Exergy, 1, 31-40.
- Lazzaretto A, Tsatsaronis G, 2001, Comparison Between SPECO-Based and Functional Exergoeconomic Approaches, In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 11-16 November, New York, 11-16.
- Lazzaretto A, Tsatsaronis G, 1997, On The Quest for Objective Equations in Exergy Costing, In Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division, 16-21 November, Dallas, 197-209.

- Li Y, Yang Y, 2014, Thermodynamic Analysis of A Novel Integrated Solar Combined Cycle”, *Applied Energy*, 122, 133-142.
- Lozano M A, Valero A, 1993, Theory of The Exergetic Cost, *Energy*, 18, 939-960.
- Moaleman A, Kasaeian A, Aramesh M, Mahian O, Sahota L, Tiwari G N, 2018, Simulation of The Performance of A Solar Concentrating Photovoltaic-Thermal Collector, Applied in A Combined Cooling Heating and Power Generation System, *Energy Conversion and Management*, 160, 191-208.
- Mosaffa A H, Mokarram N H, Farshi L G, 2017, Thermo-Economic Analysis of Combined Different ORCs Geothermal Power Plants and LNG Cold Energy, *Geothermics*, 65, 113-125.
- Ozahi E, Tozlu A, Abuşoğlu A, 2018, Thermoeconomic Multi-Objective Optimization of An Organic Rankine Cycle (ORC) Adapted to An Existing Solid Waste Power Plant, *Energy Conversion and Management*, 168, 308-319.
- Ozden E, Tari I, 2017, PEM Fuel Cell Degradation Effects on The Performance of A Stand-Alone Solar Energy System, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 13217-13225.
- Özpinar M A, 2007, Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi ve Planlanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 255s, İstanbul.
- Öztemir M H, 2011, Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi ve Aydın-Salavatlı Sahası Elektrik Üretim Santrali, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 121, 9-15.
- Öztürk K, Şahin M E, 2018, Yapay Sinir Ağları Ve Yapay Zekâ’ya Genel Bir Bakış, *Takvim-i Vekayi*, 6, 25-36.
- Padilla R V, 2011, Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants, University of South Florida, Department of Chemical and Biomedical Engineering, Graduate These, 283p, Flo Rida.
- Ratlamwala T A H, Waseem S, Salman Y, Bham A A, 2019, Geothermal and Solar Energy–Based Multigeneration System for A District, *International Journal of Energy Research*, 43, 5230-525.

- Reini M, Lazzaretto A, Macor A, 1995, Average Structural and Marginal Costs as A Result of A Unified Formulation of The Thermo-economic Problem, In Proceedings of Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century, 5-7 July, Rome, 307-323.
- Shahin M S, Orhan M F, Uygul F, 2016, Thermodynamic Analysis of Parabolic Trough and Heliostat Field Solar Collectors Integrated with A Rankine Cycle for Cogeneration of Electricity and Heat, *Solar Energy*, 136, 183-196.
- Siddiqui O, Ishaq H, Dincer I, 2019, A Novel Solar and Geothermal-Based Trigenation System for Electricity Generation, Hydrogen Production and Cooling, *Energy Conversion and Management*, 198, 111812.
- Song A, Zhu J, Zhang P, Chang N, Cui Z, 2019, Experimental Research on Solar and Geothermal Energy Coupling Power Generation System, *Energy Procedia*, 158, 5982-5987.
- Starke A R, Cardemil J M, Escobar R, Colle S, 2018, Multi-Objective Optimization of Hybrid CSP+ PV System Using Genetic Algorithm, *Energy*, 147, 490-503.
- Szargut J, Morris DR, Steward FR, 1988, Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes, Springer-Verlag, 332p, Berlin.
- Toffolo A, Lazzaretto A, 2002, Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Energetic and Economic Optimization in Thermal System Design, *Energy*, 27, 549-567.
- Tsatsaronis G, Pisa J, 1994, Exergoeconomic Evaluation and Optimization of Energy Systems-Application to the CGAM problem, *Energy*, 19, 287-321.
- Tsatsaronis G, Pisa J, Valero A, Lozano M A, Serra L, Frangopoulos C, 1994, CGAM Problem: Definition And Conventional Solution, *Energy*, 19-279-286.
- Tsatsaronis G, Ho-Par M, 2002, On Avoidable and Unavoidable Exergy Destructions and Investment Costs in Thermal Systems, *Energy Conversion and Management*, 43, 1259-1270.
- Turchi C S, Boyd M, Kesseli D, Kurup P, Mehos M S, Neises T W, Wendelin T, 2019, CSP Systems Analysis-Final Project Report, National Renewable Energy Laboratory, 90p, Golden.

- Wan P, Gong L, Bai Z, 2019, Thermodynamic Analysis of A Geothermal-Solar Flash-Binary Hybrid Power Generation System, Energy Procedia, 158, 3-8.
- Yalçın R Ç, 2012 Bir Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Isıl Analizi ve Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 86s, İzmir.
- Yamankaradeniz R, Horuz İ, Coşkun S, Kaynaklı Ö, Yamankaradeniz N, 2017, Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları, Dora Yayınları, 689s, Bursa.
- Yeni Enerji Dergisi, 2014, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, 34, 26-28.
- Yeni Enerji Dergisi, 2020, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Kurulu Gücü, 74, 21-22.
- Yigit A, Atmaca I, 2018, Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları, Dora Yayınları, 263s, Bursa.
- Yılmaz C, Kanoglu M, 2014, Thermodynamic Evaluation of Geothermal Energy Powered Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis, Energy, 69, 592-602.
- Yılmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A, 2015, Thermoeconomic Cost Evaluation of Hydrogen Production Driven by Binary Geothermal Power Plant, Geothermics, 57, 18-25.
- Yılmaz C, 2017, Thermoeconomic Modeling and Optimization of A Hydrogen Production System Using Geothermal Energy, Geothermics, 65, 32-43.
- Yılmaz C, 2017, Thermodynamic and Economic Investigation of Geothermal Powered Absorption Cooling System for Buildings, Geothermics, 70, 239-248.
- Yılmaz C, Koyuncu I, 2021, Thermoeconomic Modeling and Artificial Neural Network Optimization of Afyon Geothermal Power Plant, Renewable Energy, 163, 1166-1181.
- Yılmaz H, 2018, Güneş Enerjili Absorpsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Farklı Soğutucu Akışkan Çiftleri İçin Termodinamik Analizi, Süleyman Demiral Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Isparta.
- Yuksel Y E, Ozturk M, 2017, Thermodynamic and Thermoeconomic Analyses of A Geothermal Energy Based Integrated System for Hydrogen Production, International Journal of Hydrogen Energy, 42, 2530-2546.

- Yuksel Y E, Ozturk M, 2018, Thermodynamic Assessment of An Integrated Solar Collector System for Multigeneration Purposes, Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, 1, 363-381.
- Yuksel Y E, Ozturk M, Dincer I, 2018, Energetic and Exergetic Performance Evaluations of A Geothermal Power Plant Based Integrated System for Hydrogen Production, International Journal of Hydrogen Energy, 43, 78-90.
- Zhang H, Lin G, Chen J, 2010, Evaluation and Calculation on The Efficiency of A Water Electrolysis System For Hydrogen Production, International Journal of Hydrogen Energy, 35, 10851-10858.
- Zheng B, Xu J, Ni T, Li M, 2015, Geothermal Energy Utilization Trends from A Technological Paradigm Perspective, Renewable Energy, 77, 430-441.
- Zhou Y, Cao R, 2019, The Artificial Neural Network Prediction Algorithm Research of Rail-Gun Current and Armature Speed Based on B-Dot Probes Array, Measurement, 133, 47-55.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://home.kpmg/tr/tr/home/gorusler/2020/03/sektorel-bakis-2020-enerji.html>, 16.07.2020
- 2- <https://www.mmo.org.tr/kitaplar/turkiyenin-enerji-gorunumu-2020>, 24.06.2020
- 3- <http://www.guyad.org/TR,35/ulkemizin-birincil-kaynaklara-gore-elektrik-enerjisi-ur-.html>, 15.04.2019
- 4- <https://enerji.gov.tr/jeotermal>, 14.03.2019
- 5- <https://www.thinkgeoenergy.com/>, 17.07.2020
- 6- <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>, 04.08.2020
- 7- <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>, 19.06.2020
- 8- <https://enerji.gov.tr/gunes>, 14.03.2019
- 9- <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2020/>, 16.07.2020
- 10- https://www.yegm.gov.tr/teknoloji/CSP_gun_enj_sant.aspx, 17.07.2020
- 11- <https://global-sei.com/company/press/2016/05/prs034.html>, 11.06.2019
- 12- <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>, 20.04.2019

13- [http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/GoruntuIsleme/Goruntu_Isleme_De
rs_Notlari-11.Hafta.pdf](http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/GoruntuIsleme/Goruntu_Isleme_De
rs_Notlari-11.Hafta.pdf), 15.02.2021

14- <https://veribilimcisi.com/2017/07/14/mse-rmse-mae-mape-metrikleri-nedir/>,
03.02.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ozan ŞEN
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 539 202 05 40 / oozansenn@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Tophane Teknik Anadolu Lisesi, (2008-2012)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (2012-2017)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2018-2021)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Eroğlu Makine, Üretim Mühendisi, (2017-2018)

Yayımları (SCI ve diğer) :

Sen O, Yılmaz C, 2019, Thermodynamic Performance Analysis of Geothermal and Solar Energy Assisted Power Generation and Residential Cooling System, 3rd International Engineering Research Symposium, 05-07 Eylül, Düzce.
Sen O, Yılmaz C, 2019, Solar and Geothermal Energy Assisted Combined Multigenerational System for Power Generation, 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 17-19 Aralık, İstanbul.
Sen O, Yılmaz C, 2019, Thermoeconomic Design and Analysis of Geothermal and Solar Energy Assisted Power Generation and Hydrogen Production, 2nd International Aegean Symposium on Innovation Technologies and Engineering, 18-20 Eylül, İzmir.

- Sen O, Yilmaz C, 2020, Thermodynamic Performance Analysis of Geothermal and Solar Energy Assisted Power Generation and Residential Cooling System, International Advanced Researches And Engineering Journal, 04(01), 041-047.
- Sen O, Yilmaz C, 2020, Thermodynamic Performance Analysis of Geothermal and Solar Energy Assisted Power Generation and Residential Heating System, 2nd International Eurasian Conference On Science, Engineering And Technology, 07-09 Ekim, Gaziantep.
- Sen O, Yilmaz C, 2020, Thermoeconomic Cost Analysis of Solar and Geothermal Energy Powered Cooling and Power Cogeneration, 8th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 23-25 Ekim, Bursa.
- Sen O, Yilmaz C, 2020, Exergoeconomic Performance Evaluation of Geothermal and Solar Energy Assisted Power Generation and Residential Heating System, International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy, 19-21 Kasım, Kayseri.
- Sen O, Guler O F, Yilmaz C, Kanoglu M, 2021, Thermodynamic Modeling and Analysis of A Solar And Geothermal Assisted Multi-Generation Energy System, Energy Conversion and Management, 239, 114186.