



**AFYONKARAHİSAR İLİ İÇİN JEOTERMAL
TEMELLİ ENERJİ SİSTEMİ MODELLEMELERİ
VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuba CİĞERCİ

Danışman

Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AFYONKARAHİSAR İLİ İÇİN JEOTERMAL TEMELLİ ENERJİ
SİSTEMİ MODELLEMELERİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Tuba CİĞERCİ

Danışman

Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Tuba CİĞERCİ tarafından hazırlanan “Afyonkarahisar İli İçin Jeotermal Temelli Enerji Sistemi Modellemeleri Ve Termodinamik Analizi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ... / ... / tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

Başkan : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi **İmza**

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi **İmza**

Üye : Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üni., Tek.Fak. **İmza**

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

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

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.

... / ... /

Tuba CİĞERCİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AFYONKARAHİSAR İLİ İÇİN JEOTERMAL TEMELLİ ENERJİ SİSTEMİ MODELLEMELERİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ

Tuba CİĞERCİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

Günümüzde dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji ihtiyacı da buna bağlı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Fosil yakıtların yenilenememesi, maliyet, olumsuz çevresel ve atmosferik etkiler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal, dalga ve biyokütle kaynakları yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerji sürekli bir enerji kaynağı olması yanı sıra; ucuz, temiz, çevre dostu olması ve sifıra yakın emisyon sunması ile en önemli enerji kaynaklarından birisidir. Jeotermal enerji, bu özelliklerinin yanında farklı kullanım alanlarına uygulanabilir olması ile alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Jeotermal enerji elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma, seracılıkta, kimyasal madde ve mineral üretimi gibi birçok alanda tercih edilmektedir.

Ülkemiz Alp-Himalaya tektonik kuşağı üzerinde bulunması sebebiyle zengin jeotermal kaynaklara sahip ülkelerden birisidir. Afyonkarahisar ili jeotermal enerji bakımından zengin bir yapıya sahip olup Türkiye'nin ikinci büyük jeotermal sahasıdır. İl sınırları içerisinde “Ömer-Gecek”, “Gazlıgöl”, “Hüdai” ve “Heybeli” olmak üzere toplam dört jeotermal saha bulunmaktadır. Afyonkarahisar iline ait jeotermal alanlar düşük sıcaklık değerine sahip jeotermal alanlar arasında geçmektedir. Orta ve düşük sıcaklık değerindeki jeotermal enerji kaynakları (150°C'nin altında), konut ve sanayi sektöründe doğrudan ısı enerjisi olarak kullanılabilir.

Afyonkarahisar ilinde bulunan Ömer-Gecek sahası jeotermal kaynağının aktif kullanımları incelenmiş olup alternatif üretim seçenekleri önerilmektedir. Ömer-Gecek sahasında 11 adet aktif kuyu bulunmakta olup bu kuyulardan çıkan jeotermal suyun sıcaklıkları 80-120 °C arasındadır. Bu sahada elektrik üretimi Organik Rankine Çevrimi ile yapılmakta olup, kurulu güç 2,76 MWe eşdeğerindedir.

Jeotermal enerjinin üretimi hidrodinamik ve hidrotermal mekanizmaları harekete geçirerek akışkan hareketi ve ısı yayılımı oluşturmaktadır. Bu mekanizmaların matematiksel olarak diferansiyel denklemlerle ifade edilmesi ve jeotermal rezervuarın kavramsal modeline dayalı olarak belirlenen parametreler ve uygun sınır koşullarının uygulanması ile jeotermal rezervuarın modellenmesi yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında Ömer-Gecek jeotermal sahasının detaylı bir şeması çizilerek her bir akış için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri Engineering Equation Solver (EES) program yardım ile çözülmüştür. Ek olarak bu jeotermal sahanın kojenerasyon, trijenerasyon ve multijenerasyon yöntemleri ile çalışmasına dair detaylı şemalar çizilerek kütle, enerji, entropi ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler kullanılarak bu yöntemlerin mevcut sistem ile karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen multijenerasyon, trijenerasyon ve kojenerasyon sistemlerin verimlerinin yüksek olduğu ve Afyonkarahisar jeotermal kaynaklarının kullanılarak farklı çıktılar alınabileceği görülmüştür.

2019, xiii + 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Jeotermal, Termodinamik Analiz, ORC, EES, Kojenerasyon, Trijenerasyon, Multijenerasyon

ABSTRACT

M.Sc Thesis

DESIGNS AND THERMODYNAMIC ANALYSIS OF GEOTHERMAL BASED ENERGY SYSTEM FOR AFYONKARAHISAR PROVINCE

Tuba CİĞERCİ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Yunus Emre YÜKSEL

Today, with the increase in the world population, the need for energy is increasing day by day. The tendency to renewable energy sources has increased due to the inability to renew fossil fuels, cost, negative environmental and atmospheric effects. Hydroelectric, wind, solar, geothermal, wave and biomass resources are examples of renewable energy resources. In addition to being a continuous energy source, geothermal energy from renewable energy sources; It is one of the most important energy sources as it is cheap, clean, environmentally friendly and offers almost zero emissions. In addition to these features, geothermal energy stands out as an alternative with its applicability to different areas of use. Geothermal energy is preferred in many areas such as electricity generation, heating and cooling, greenhouse cultivation, chemical and mineral production.

Our country is one of the countries with rich geothermal resources due to its location on the Alpine-Himalayan tectonic belt. Afyonkarahisar province has a rich structure in terms of geothermal energy and is the second largest geothermal field in Turkey. There are a total of four geothermal fields within the provincial borders, namely “Ömer-Gecek”, “Gazlıgöl”, “Hüdai” and “Heybeli”. The geothermal fields of Afyonkarahisar province pass between the geothermal fields with low temperature values. Medium and low temperature geothermal energy sources (below 150°C) can be used directly as heat energy in the residential and industrial sectors.

The active uses of the Ömer-Gecek field geothermal resource in Afyonkarahisar province have been examined and alternative production options are suggested. There are 11 active wells in Ömer-Gecek field and the temperatures of the geothermal water coming out of these wells are between 80-120 °C. Electricity generation at this site is made by the Organic Rankine Cycle and the installed power is equivalent to 2.76 MWe.

The production of geothermal energy creates fluid motion and heat dissipation by activating hydrodynamic and hydrothermal mechanisms. Modeling of the geothermal reservoir can be done by expressing these mechanisms mathematically with differential equations and applying the parameters and appropriate boundary conditions based on the conceptual model of the geothermal reservoir.

In this thesis, a detailed diagram of the Ömer-Gecek geothermal field was drawn and the mass, energy, entropy and exergy balance equations for each flow were solved with the help of the Engineering Equation Solver (EES) program. In addition, detailed diagrams for the operation of this geothermal field with cogeneration, trigeneration and multigeneration methods were drawn and mass, energy, entropy and exergy analyzes were made. By using the analyzes made, these methods were compared with the existing system. As a result of the study, it has been seen that the efficiency of the proposed multigeneration, trigeneration and cogeneration systems is high and different outputs can be obtained by using Afyonkarahisar geothermal resources.

2019, xiii + 85 pages

Keywords: Geothermal, Thermodynamic Analysis, ORC, EES, Cogeneration, Trigeneration, Multigeneration

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yunus Emre Yüksel'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm her daim maddi ve manevi destek olan başta Prof. Dr. İbrahim Hakkı CİĞERCİ, Doç. Dr. İsmail CİĞERCİ ağabeylerime, anneme ve bu süreçte yanımda olmasa da kalbimin en derininde olan rahmetli babama minnettarım.

Tuba CİĞERCİ
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Enerji.....	4
2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	4
2.2.1 Güneş Enerjisi	5
2.2.2 Rüzgâr Enerjisi.....	6
2.2.3 Hidroelektrik Enerji	8
2.2.4 Biyokütle Enerjisi	9
2.2.5 Jeotermal Enerji	11
2.3 Jeotermal Enerjinin Sınıflandırılması	13
2.4 Jeotermal Enerji Üretimi.....	13
2.4.1 Kuru Buhar Sistemi.....	14
2.4.2 Flaş Buhar Sistemi	15
2.4.3 İkili Döngü Sistemi	16
2.5 Jeotermal Kullanım Alanları.....	17
2.6 Jeotermal Enerjinin Avantajları	18
2.7 Jeotermal Enerjinin Dezavantajları.....	18
2.8 Jeotermal Alanların Araştırılması	19
2.9 Dünyadaki Jeotermal Enerji Kaynakları.....	20
2.10 Türkiye’deki Jeotermal Enerji Kaynakları	21
2.11 Afyonkarahisar İlindeki Jeotermal Enerji Kaynakları	23
2.11.1 Ömer-Gecek Jeotermal Alanı.....	25

2.11.2 Heybeli Jeotermal Alanı.....	25
2.11.3 Sandıklı Jeotermal Alanı	25
2.11.4 Gazlıgöl Jeotermal Alanı.....	26
2.12 AFJET (Afyonkarahisar Jeotermal Enerji Tesisleri)	26
3. MATERYAL VE METOT	27
3.1 Termodinamik Analiz	27
3.1.1 Kütle Balansı.....	28
3.1.2 Enerji Balansı	28
3.1.3 . Entropi Balansı.....	29
3.1.4 Ekserji Balansı	29
3.1.5 Termodinamik Verimlilikler	31
3.1.5.1 Enerji Verimliliği	31
3.1.5.2 Ekserji verimliliği.....	32
4. BULGULAR	34
4.1 Sistem Modelleri ve Analizleri	34
4.1.1 Afyonkarahisar Mevcut ORC Sistemi	34
4.1.2 Kojenerasyon Sistemi	35
4.1.3 Trijenerasyon Sistem.....	36
4.1.4 Multijenerasyon sistem	38
4.2 Araştırma Bulguları	40
4.2.1 Afyonkarahisar mevcut ORC Sistemi.....	40
4.2.2 Kojenerasyon (elektrik + ısıtma) Enerji Üretim Sistemi	41
4.2.3 Parametrik Analizler	42
4.2.3.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi.....	42
4.2.3.2 Jeotermal Akışkanın Debişinin Etkisi	45
4.2.3.3 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi	49
4.2.4 Tri-jenerasyon (Elektrik + Isıtma + Soğutma) Enerji Üretim Sistemi.....	53
4.2.5 Parametrik Analizler	54
4.2.5.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi.....	55
4.2.5.2 Jeotermal Akışkanın Debişinin Etkisi	57
4.2.5.3 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi	59
4.2.6 Multijenerasyon (Elektrik + Isıtma + Soğutma + Hidrojen) Enerji Üretim	

Sistemi.....	61
4.2.7 Parametrik Analizler	63
4.2.7.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi.....	63
4.2.7.2 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi	69
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	73
6. KAYNAKÇA	81
ÖZGEÇMİŞ.....	85



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CO₂ karbondioksit
H₂S hidrojen sülfür
SO_x kükürt oksit
R134a soğutucu gaz
R113 soğutucu akışkan
R- 600 izobütan
R-290 propan

Kısaltmalar

AFJET Afyon Jeotermal Isıtma Tesisleri
C derece
EES Engineering Equation Solver
GWh gigawattsaat
HEX ısı değiştiricisi
kWh kilowattsaat
MTA maden tetkik arama genel müdürlüğü
MW megawatt
MWt megawattsaat
ORC organik rankine çevrimi
PEM proton değişim membranı
PV fotovoltaik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Türkiye jeotermal kaynaklar haritası	2
Şekil 2.1 Jeotermal sistemin şematik görünümü	12
Şekil 2.2 Kuru buhar sisteminin temel çalışma prensibi	14
Şekil 2.3 Flaş buhar sisteminin temel çalışma prensibi	16
Şekil 2.4 İkili döngü sisteminin temel çalışma prensibi	17
Şekil 2.5 Türkiye jeotermal kaynaklar ve volkanik alanlar haritası	22
Şekil 2.6 Afyonkarahisar ili jeotermal alan haritası	24
Şekil 4.1 Afyonkarahisar ORC sisteminin şematik gösterimi.	34
Şekil 4.2 Önerilen kojenerasyon sistem.....	35
Şekil 4.3 Önerilen trijenerasyon sistemin şematik gösterimi.	36
Şekil 4.4 Multijenerasyon sisteminin şematik gösterimi.	38
Şekil 4.5 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.	43
Şekil 4.6 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.	44
Şekil 4.7 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	44
Şekil 4.8 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.	45
Şekil 4.9 Jeotermal akışkanın debisinin enerji verimlerine etkisi.	46
Şekil 4.10 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji verimlerine etkisi.	47
Şekil 4.11 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	48
Şekil 4.12 Jeotermal akışkanın debisinin üretim miktarlarına etkisi.	49
Şekil 4.13 Jeotermal akışkanın sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.	51
Şekil 4.14 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.	51
Şekil 4.15 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.	52
Şekil 4.16 Jeotermal akışkanın sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.	53
Şekil 4.17 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.	55
Şekil 4.18 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.	56
Şekil 4.19 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	56
Şekil 4.20 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.	57
Şekil 4.21 Jeotermal akışkanın debisinin enerji verimlerine etkisi.	57
Şekil 4.22 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji verimlerine etkisi.	58
Şekil 4.23 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	58

Şekil 4.24 Jeotermal akışkanın debisinin üretim miktarlarına etkisi.	59
Şekil 4.25 Jeotermal akışkanın sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.	59
Şekil 4.26 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.	60
Şekil 4.27. Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.	60
Şekil 4.28 Jeotermal akışkanın sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.	61
Şekil 4.29 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.	64
Şekil 4.30 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.	64
Şekil 4.31 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	65
Şekil 4.32 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.	65
Şekil 4.33 Referans sıcaklık değişiminin hidrojen üretimine etkisi.	66
Şekil 4.34 Jeotermal akışkan debisinin enerji verimlerine etkisi.	66
Şekil 4.35 Jeotermal akışkan debisinin ekserji verimlerine etkisi.	67
Şekil 4.36 Jeotermal akışkan debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.	68
Şekil 4.37 Jeotermal akışkan debisinin üretim miktarlarına etkisi.	68
Şekil 4.38 Jeotermal akışkan debisinin hidrojen üretimine etkisi.	69
Şekil 4.39 Jeotermal akışkan sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.	70
Şekil 4.40 Jeotermal akışkan sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.	70
Şekil 4.41 Jeotermal akışkan sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.	71
Şekil 4.42 Jeotermal akışkan sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.	72
Şekil 4.43 Jeotermal akışkan sıcaklığının hidrojen üretimine etkisi.	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Belirli sıcaklıklara göre jeotermal enerjinin kullanım alanları	17
Çizelge 2.2 Dünyadaki jeotermal kaynaklı kurulu güç ve üretim değerleri.	21
Çizelge 2.3 Jeotermal potansiyelin bölgelere göre dağılımı.	23
Çizelge 3.1 Mevcut sistem ve önerilen sistemler için enerji verim denklemleri.	32
Çizelge 3.2 Mevcut sistem ve önerilen sistemler için ekserji verim denklemleri	33
Çizelge 4.1 Kojenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.	41
Çizelge 4.2 Kojenerasyon sistem ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları.....	41
Çizelge 4.3 Tri-jenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.	53
Çizelge 4.4 Tri-jenerasyon sistemin ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları.	54
Çizelge 4.5 Multijenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.	62
Çizelge 4.6 Multijenerasyon sistem ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları	63

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Güneş enerjisi santrali	6
Resim 2.2 Rüzgâr türbinleri.....	8
Resim 2.3 Hidroelektrik santrali	9
Resim 2.4 Biyokütle enerji santrali.....	10



1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü kömür, doğal gaz ve petrol gibi enerji kaynaklarında karşılanır. Enerji ve enerji kaynakları, geçmişten bugüne önemli bir yer tutmaktadır. Dünyadaki enerji ihtiyacının her geçen gün artması sonucunda enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu enerji kaynakları dünya üzerinde sınırlı olup, artan enerji ihtiyacına bağlı olarak tükenmektedir. Bu sorun doğrultusunda üretim ve tüketim dengesinin sağlanmasında ilerleyen zamanlarda sorunlar yaşanabilecektir. Buna ek olarak bahsedilen enerji kaynaklarının kullanılması sonucu sera gazı salınımı önemli oranda artmakta ve küresel ısınma gibi önemli sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu açıdan günümüzde güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle olmak üzere yenilenebilir enerji sistemleri, çevre dostu ve sürdürülebilir olması neticesinde önemli enerji kaynaklarındandır (Kozak 2020).

Türkiye'nin enerji kaynakları incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelinin azımsanmayacak derecede olduğu açıkça görülmektedir. Fakat yenilenebilir enerjiden yeteri kadar yararlandığımız söylenemez. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi bakımından zengin bir ülke olmamız neticesinde bu kaynakların kullanımı ülke bütçesine önemli katkı sağlayacaktır (Demirkol ve Çunkaş 2014). Türkiye, Alp-Himalaya kuşağında yer alması nedeniyle zengin bir yapıya sahiptir. Türkiye'deki jeotermal kaynaklar dünya jeotermal potansiyelinin yaklaşık %12,5'ini oluşturmaktadır ve Türkiye bu potansiyel ile dünyada yedinci Avrupa da birinci sırada yer almaktadır (Durdu 2014). Günümüzde dünya birincil enerji tüketimi incelendiğinde; fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz ve kömür) %80, yenilenebilir enerji kaynakları (biyokütle, su, jeotermal, rüzgâr, güneş ve dalga) %14, nükleer enerji ise %6 oranına sahiptir. Jeotermal enerji yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde %4 lük bir orana sahiptir (Kervankıran 2012). Ükelere göre değişik sınıflandırmalar olmasına rağmen jeotermal enerji kaynakları; düşük (20-70°C), orta (70-150 °C) ve yüksek (150°C'dan yüksek) entalpili (sıcaklıklı) olmak üzere genelde üç gruba ayrılmaktadır.

Günümüzde jeotermal enerji elektrik üretiminde, ısıtma ve soğutma sistemlerinde ve turizm gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Jeotermal enerji kaynağı diğer enerji

konut ısınmakta ve bölgede hızla gelişmekte olan turizm sektöründe termal oteller, devre mülkler ve birçok farklı alanda jeotermal enerji kullanılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada Afyonkarahisar ilinde bulunan jeotermal kaynakları kullanılarak mevcut ORC sisteminin enerji ve ekserji analiz yapılmıştır. Aynı zamanda bu kaynak kullanılarak elektrik ve ısıtma, elektrik, ısıtma ve soğutma, ve elektrik, ısıtma, soğutma ve hidrojen üreten sistemler tasarlanmış ve termodinamik analizleri yapılmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Enerji

Enerji kelimesinin kökeni eski Yunan dilinden türemektedir. Aktif ve iş sözcüklerinden türetilmiştir. Enerji kavramının kısa tanımı hareket ettirici güç anlamına gelmektedir. Enerji günlük yaşantımızda insanoğlunun ve ülkelerin en vazgeçilmez unsurlarından birisi haline gelmiştir. Enerji hayatımızda üretim faaliyetlerini, kalkınma gücünü ve yaşam aktivitelerini etkilemektedir. Enerji, fiziksel sistemlerin çalışması, hareket etmesi veya değişmesi için gereken potansiyel veya kinetik kaynaklardan elde edilen bir kavramdır. Enerji, bir sistemin veya parçacığın iş yapabilme yeteneği veya bir etki yaratma potansiyeli olarak düşünülebilir.

Fiziksel sistemlerde enerji, çeşitli formlarda var olabilir. Bunlar arasında termal enerji (ısı), kinetik enerji (hareket enerjisi), potansiyel enerji (yükseklik, gerilim veya kimyasal bağlar gibi potansiyel farklılıkları), elektrik enerjisi, manyetik enerji, nükleer enerji ve diğerleri bulunur. Bu enerji formları birbirine dönüşebilir ve korunum prensibi uyarınca enerji ne yoktan var edilebilir ne de tamamen yok edilebilir; sadece bir formdan diğerine dönüşebilir.

Enerji, evrende yaygın olarak bulunan bir kavramdır ve hayatımızın birçok alanında etkilidir. Sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme ihtiyacı, çevresel ve ekonomik nedenlerle giderek daha önemli hale gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar, güneş, hidrolik, biyokütle ve jeotermal gibi doğal süreçlerden elde edilen enerjiyi kullanırken, enerji verimliliği çabaları da enerji kaynaklarının daha etkin ve tasarruflu kullanılmasını hedefler.

2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğal kaynakların sürekli olarak yenilendiği ve tükenmediği enerji kaynaklarından elde edilen enerjidir. Bu kaynaklar, doğada sürekli olarak yenilenen ve insan faaliyetleri tarafından tükenmeyen kaynaklardır. Bu enerji kaynakları, güneş,

rüzgâr, su (hidroelektrik), jeotermal ve biyokütle gibi doğal süreçlerle oluşan kaynaklardan elde edilir. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara kıyasla daha temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji seçeneği sunar. Yenilenebilir enerjinin kullanım alanları oldukça geniştir. Enerji günlük hayatımızda çok önemli bir yere sahiptir. Doğalgaz, kömür ve petrol gibi enerji kaynaklarının hızlı ve bilinçsiz bir şekilde tüketimi ve çevreye verilen zararlar insanları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönlendirmektedir.

Türkiye'nin enerji kaynaklarına bakıldığında ülkemizdeki yenilenebilir enerji potansiyel oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Fakat ülkemiz yenilenebilir enerjiden yeterli oranda yararlanamamaktadır. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi ülke bütçesine büyük oranda katkı sağlayabilecektir. Türkiye enerji kaynağını %67 oranında dış ülkelerden sağlamaktadır. Bu netice sonucunda ülkemizde yenilenebilir enerji kullanımının artması gerekmektedir.

2.2.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi kaynağı bol, sürekli, yenilenebilir ve ücretsiz bir enerji kaynağı türüdür. Bu avantajı ile beraber fosil yakıtlarından enerji elde edilmesinden kaynaklanan çevre kirliliği gibi sorunlarının çoğunun güneş enerjisinin kullanılmasında olmaması bu enerji kaynağını önemli bir hale getirmektedir. Geleneksel enerji kaynakları çevreye karbondioksit yayılımı sonucunda atmosferdeki karbondioksit oranı artmıştır. Atmosferde karbondioksit oranının artması son yüzyıl içerisinde ortalama 0.7 yükselmiştir. Dünya ortalama sıcaklık değerinin yükselmesi iklim koşullarında hissedilebilir değişimlere yol açmaktadır. Bu sorundan ötürü insanoğlunun enerji kullanımında azalma olmayacağı için güneş enerjisi gibi doğal, çevre dostu, temiz, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi gerekmektedir.

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) sistemler ve termal enerji sistemleri olmak üzere iki temel şekilde kullanılır. Fotovoltaik sistemler, güneş panelleri aracılığıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Güneş panelleri Resim 2.1'de görüldüğü gibi, yarı iletken malzemelerden yapılan hücrelerden oluşur ve güneş ışığından gelen

fotonları elektrik enerjisine çevirir. Bu elektrik enerjisi, evlerde, işyerlerinde veya elektrik şebekesine bağlı olmayan bölgelerde kullanılabilir. Termal enerji sistemleri ise güneş enerjisini kullanarak suyu veya başka bir akışkanı ısıtmak için kullanılır. Isıtılan su veya akışkan, sıcak su sağlamak, ısıtmak veya buhar üretmek için kullanılabilir. Bu sistemler, evlerde, işyerlerinde ve endüstriyel tesislerde sıcak su veya ısıtma ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilir.



Resim 2.1 Güneş enerjisi santrali (İnt. Kyn. 2).

2.2.2 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, yeryüzünün farklı yüzeylerine farklı derecelerde güneşin ısıtmasıyla meydana gelen basınç farkından kaynaklı havayı harekete geçirmesiyle oluşmaktadır. Havadaki sıcaklığın, nem oranının ve basıncın; farklı yüzeylerde farklı ısınmasından kaynaklı olarak farklılaşmalara neden olmaktadır. Basınç farkı ise havanın yeryüzündeki hareketine yol açmaktadır. Hareket halinde olan havanın kinetik enerjisi rüzgâr olarak ifade edilebilir. Rüzgâr atmosferde fazla oranda ve serbest bir şekilde bulunan, emisyonu olmayan, güvenli ve doğal kaynakların tükenmesine yol açmayan, küresel

ısınımayı arttırmayan, asit yağmurlarına neden olmayan, güvenilir, çevreye zarar vermeyen ve yenilenebilir enerji kaynağıdır (Sarıkaya 2010).

Rüzgâr enerjisinden kaynaklı elektrik üretimi için kanat-pervane şeklinde adlandırdığımız elemanlar vasıtasıyla rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda güneşin dünyayı uzun bir süre ısıtacağı göz önünde bulundurulduğunda rüzgâr enerjisi tükenmeyen ve yenilenebilen enerji kaynağıdır.

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisi oluşturmak için ana eleman olup, hareket halindeki havadan sağlanan kinetik enerjiyi öncelikle mekanik enerjiye sonrasında ise elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir (Kavcıoğlu 2019). Rüzgâr türbinleri Resim 2.2’de görüldüğü gibi genelde kule, üreteç (jeneratör), dişli kutusu, elektrik-elektronik modül ve kanatlardan (pervane) oluşmaktadır. Kısa sürede gerekli enerjiyi karşılayan rüzgar türbinleri oldukça önemlidir.

Rüzgâr enerjisi, dünya genelinde hızla yaygınlaşmaktadır. Teknolojik ilerlemeler, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini artırmış ve maliyetlerini düşürmüştür. Ayrıca, birçok ülke rüzgâr enerjisi projelerini teşvik etmek için politikalar ve teşvikler geliştirmiştir. Bununla birlikte, rüzgâr enerjisi de bazı zorluklarla karşılaşabilir. Rüzgâr enerjisi, rüzgârın sürekli ve istikrarlı olmadığı durumlarda istikrarlı bir enerji kaynağı sağlayamaz. Rüzgârın hızı ve şiddeti, enerji üretimini etkileyebilir. Ayrıca, rüzgâr çiftliklerinin doğal yaşam alanlarına etkisi ve görsel kirlilik gibi konular da bazı tartışmalara neden olabilir. Ancak, genel olarak rüzgâr enerjisi, temiz ve süreklilik açısından kabul edilen bir enerjidir. Gelecekte, daha gelişmiş rüzgâr teknolojileri ve enerji depolama çözümleriyle birlikte rüzgâr enerjisinin kullanımının artması beklenmektedir.



Resim 2.2 Rüzgâr türbinleri (İnt. Kyn. 3).

2.2.3 Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerjisi, suyun kinetik enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten bir enerji üretim yöntemidir. Bu enerji türü, suyun doğal yollardan elde edildiği akarsular, nehirler ve barajlar gibi su kaynaklarından faydalanır. Hidroelektrik enerjisi, suyun potansiyel enerjisini kinetik enerjiye dönüştürmek için suyun yüksek bir noktadan aşağı doğru akmasıyla çalışır. Bu, suyun türbin adı verilen bir cihazdan geçirilerek mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Daha sonra türbin, bir jeneratörle bağlantılıdır ve dönen türbin, jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisi üretir. Hidroelektrik enerjisi, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Bunun nedeni, suyun yenilenebilir bir kaynak olması ve enerji üretimi sırasında doğrudan sera gazı emisyonu oluşturmamasıdır. Ayrıca hidroelektrik santralleri, enerji talebine hızlı bir şekilde yanıt verebilen esnek sistemlere sahiptir ve elektrik enerjisi üretimi düzenlemesi kolaydır. Hidroelektrik santrallerin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar arasında düşük işletme maliyetleri, enerji üretiminin isteğe bağlı kontrolü, su depolama ve sel kontrolü gibi su yönetimi imkanları sayılabilir. Ayrıca hidroelektrik santralleri, uzun ömürleri boyunca

sürekli ve güvenilir bir enerji kaynağı sağlar. Ancak hidroelektrik enerjisiyle ilişkili bazı zorluklar da vardır. Barajların ve hidroelektrik santrallerin inşası ekosistemlere etki edebilir ve bazı durumlarda doğal yaşam alanlarını bozabilir. Ayrıca su kaynaklarının düzensizliği, hidroelektrik enerji üretimini etkileyebilir. Kurak dönemlerde veya su kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde hidroelektrik enerjisi üretimi azalabilir. Resim 2.3 ile örnek hidroelektrik santrali görülmektedir.



Resim 2.3 Hidroelektrik santrali (İnt. Kyn. 4).

2.2.4 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi biyolojik kaynaklardan elde edilen enerjidir. Organik malzemelerin (bitkiler, hayvan atıkları, odun vb.) yanması veya fermantasyonu yoluyla enerji üretilir. Bu enerji kaynağı çevre dostu bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve fosil yakıtların kullanımının azaltılmasına katkıda bulunur. Biyokütle ısınmada, yakıt üretiminde ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Biyokütle katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Biyokütle 100 yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilmektedir. Orman ekosistemi içerisinde yer alan odunsu materyaller enerji amacıyla kullanılan biyolojik kaynakların en önemlisidir.

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir bir kaynak olmasının yanı sıra, organik atıkların geri dönüşümünü sağlayarak çevresel açıdan da faydalıdır. Atıkların enerji üretiminde kullanılması, çöp miktarının azalmasına ve çöp depolama alanlarının daha etkin kullanılmasına yardımcı olur. Ancak, biyokütle enerjisi kullanımıyla ilgili bazı önemli hususlar da vardır. Biyokütle kaynakları sınırlıdır ve bu kaynakların sürdürülebilir yönetimi önemlidir. Ayrıca, biyokütle enerjisi üretimi için tarım üretimi veya ormancılık gibi faaliyetlerin çevresel etkileri dikkate alınmalı ve sürdürülebilir yöntemler benimsenmelidir.

Biyokütle enerjisi farklı formlarda kullanılabilir. Bu formlar sırası ile biyokütle ısıtma, biyogaz, biyodizel ve biyokütle elektrik şeklindedir. Biyokütle ısıtma formunda odun, bitki atıkları ve tarımsal yan ürünler gibi biyokütle yakıtlarının yakılmasıyla ısı enerjisi üretilmektedir. Bu ısı enerjisi evleri, işyerlerini ve endüstriyel tesisleri ısıtmak için kullanılmaktadır. Biyogaz formu organik maddelerin fermantasyonu süreciyle üretilmekte olup karbondioksit ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Gaz sobalarında, ısıtma sistemlerinde ve elektrik üretimi için kullanılan gaz türbinlerinde yakılabilir. Biyodizel formu bitkisel yağlardan veya hayvansal yağlardan üretilmektedir. Dizel motorlu araçlarda kullanılabilir ve fosil yakıtlara kıyasla daha az sera gazı emisyonu açığa çıkar. Son olarak biyokütle elektrik formu enerji santrallerinde yanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Biyokütle yakıtı, enerji santrallerinde yanma işlemiyle buhar üretir ve bu buhar türbinleri çalıştırarak elektrik üretir. Resim 2.4 ile örnek biyokütke santrali görülmektedir.



Resim 2.4 Biyokütle enerji santrali (İnt. Kyn. 5).

2.2.5 Jeotermal Enerji

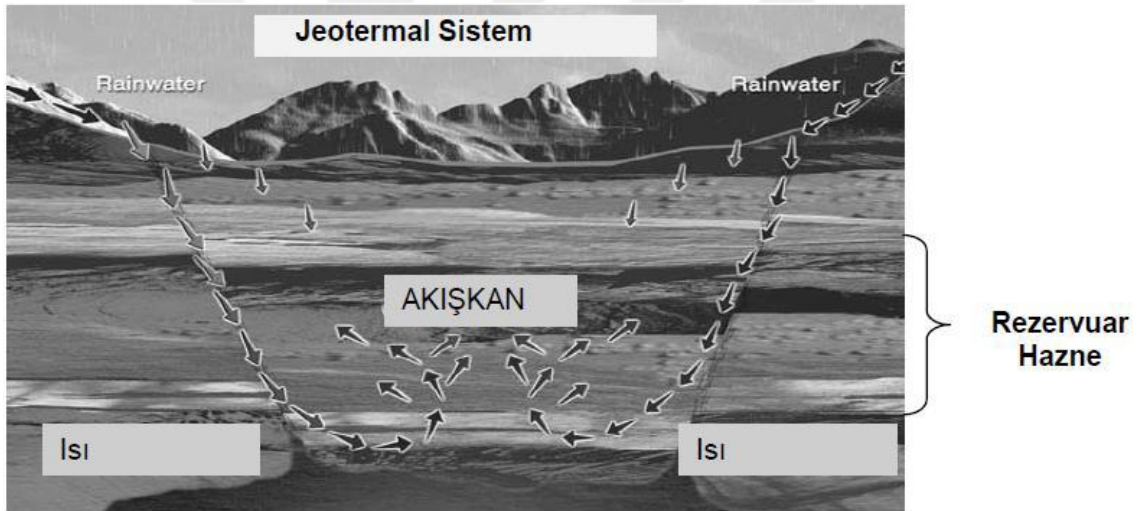
Jeotermal enerji kelimesi Yunanca “geo” (yeryüzü) ve thermos (ısı) kelimelerin birleşiminden oluşarak yer ısısı anlamına gelmektedir. Jeotermal enerji dünyanın iç ısının yeryüzüne taşınması sonucunda meydana çıkan bir enerji kaynağıdır. Jeotermal enerji, ısı kaynağının yeryüzüne yaklaşması ile oluşmaktadır ve yer kabuğunda varolan ısı enerjisinin tümünü kapsamaktadır. Bu yüzden jeotermal enerjinin bulunduğu yerler yeryüzünün bölgesel ve yerel yapısına bağlıdır. Jeotermal enerjinin depolanmış olması ve yeryüzüne yakın bulunması en önemli özelliğidir.

İletim ve taşıma yoluyla yeryüzüne ulaşan jeotermal akışkan; sıcaklık değerine bağlı olarak elektrik üretimi başta olmak üzere ısıtma, soğutma, seracılık, termal ve sağlık gibi birçok amaç için kullanılmaktadır. Elektrik üretimi için jeotermal kaynaklardan çıkan buhar veya sıcak su, türbinleri döndüren bir türbin-jeneratör sistemi kullanılmaktadır.

Jeotermal enerji çevre dostu bir enerji kaynağı olması sebebi ile yenilenebilir enerji kaynağı grubunda sayılmaktadır. Fakat bazı durumlarda jeotermal enerjinin üretimi çevresel etkilere neden olabilir. Bu etkiler jeotermal enerji kaynağının, su kaynaklarını tüketmesi, gaz ve kükürt dioksit emisyonları gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle jeotermal enerji projeleri hazırlanırken çevresel sorunları en aza indirebilecek seviyede dikkatli bir şekilde planlanmalıdır.

Jeotermal enerji kaynaklarının sıcaklık değerleri atmosferdeki sıcaklığın üzerinde bir sıcaklık değerine sahiptir. Fazla tuz, mineral ve gaz içeren sıcak su ve buhardan oluşan hidrotermal enerjidir. Yeryüzünde bulunan kaynaklar, kar, yağmur ve dolu gibi yağış olaylarının devam etmesi ile jeotermal enerji sürekli olarak beslenebilmektedir. Yani yeryüzünde bulunan su kaynaklarının devamlı olması jeotermal enerjinin varlığını da devam ettirmektedir. Jeotermal enerji bu bağlamda akışkan kullanımı beslenme tüketiminden fazla olmadığı sürece yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır.

Jeotermal enerji sisteminin sistemin birincil unsurları Isı kaynağı, Rezervuar, Isıyı taşıyan akışkan, Örtü Kaya olmak üzere 4 başlık altına toplanmıştır (Doğanay ve Coşkun 2017). Isı kaynağının yüksek sıcaklık değeri 600 °C üzerinde ve yer yüzeyine yakın sahalarda magmatik sokulum özelliği gösterebileceği gibi, düşük sıcaklıklı sistemler içinde derinlikle birlikte artan normal sıcaklık şeklinde de olabilmektedir. Rezervuar ise ısıyı taşıyan sıvının devir-daim edebileceği veya taşınım yapabileceği çatlaklı kayalardır. Rezervuarların üzerinde yer alan geçirimsiz seviyeler örtü kayayı oluşturmaktadır. 5/30 Jeotermal akışkan ise birçok koşulda meteorik sudur ve rezervuarda sıcaklık değerlerine ve basınç miktarlarına bağlı olarak buhar veya sıvı halde bulunmaktadır. Bu sular genel olarak bünyesinde bazı kimyasal maddeler ile gazlar (CO₂, H₂S gibi) bulundurmaktadır. (Çetin 2014). Şekil 2.1’de bir jeotermal sistemin şematik görünümü görülmektedir.



Şekil 2.1 Jeotermal sistemin şematik görünümü (İmamoğlu, 2009).

Türkiye’de ilk jeotermal enerji araştırmaları 1960 yılında MTA tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda büyük oranda düşük ve orta entalpiye sahip 170 jeotermal alan tespit edilmiştir. Belirtilen alanlardan sadece 12 tanesi günümüz teknolojisi ve olanaklar göz önünde bulundurulduğunda elektrik enerjisi üretimine uygundur.

2.3 Jeotermal Enerjinin Sınıflandırılması

Literatürde jeotermal enerjinin sınıflandırılmasında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan sınıflandırma yöntemi sıcaklık değerine göre yapılan sınıflandırma yöntemidir (Serpel 2001). Bu sınıflandırmaya göre jeotermal enerji kaynakları;

- Düşük Sıcaklıklı Sahalar (20-70 °C sıcaklık)
- Orta Sıcaklıklı Sahalar (70-150 °C sıcaklık)
- Yüksek Sıcaklıklı Sahalar (150 °C den yüksek sıcaklık)

Olarak kabul edilmektedir.

2.4 Jeotermal Enerji Üretimi

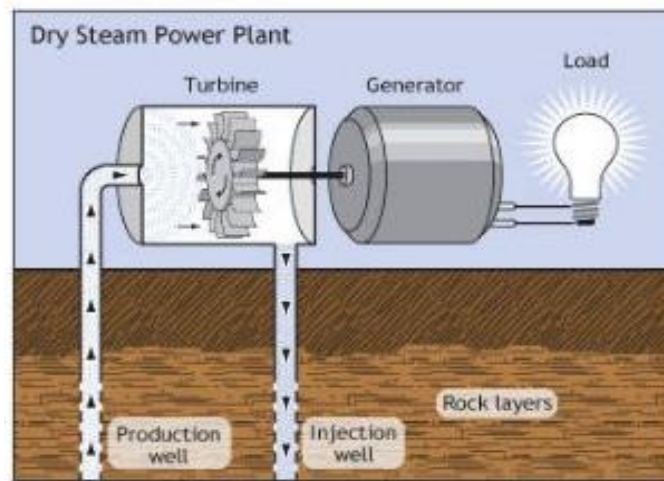
Elektrik üretimi jeotermal enerjinin en önemli kullanım alanıdır. Elektrik üretimi basit olarak buhar türbini ve jeneratör kullanarak elde edilir. Rezervin içerisine girilerek sıcak su veya buharın tesisin içine alınması ile elektrik üretimi elde edilir. Jeotermal enerji kullanarak elektrik üretim metotları yıllar içerisinde teknolojiye bağlı olarak çeşitlilik göstermiştir. Jeotermal enerjinin kaynak sıcaklığına bağlı olarak kuru buhar, flaş buhar ve ikili buhar yöntemleri Jeotermal sistemler için kullanılan en yaygın yöntemler arasında yer almaktadır. Kuru buhar enerjisinin bulunduğu santraller sıcaklık değeri 300 °C'ye kadar çıkabilen jeotermal buharı kullanmaktadır. Flaş buharın uygulanması için gerekli sıcaklık aralığı jeotermal tuzlu suyun buharlaşmasına sebebiyet veren bir basınç düşüşünün eşlik ettiği sıcak tuzlu suyun kuyudan aktığı 180 °C'nin üzerindeki sıcaklıkları içermektedir. İkili buhar metodu ise düşük ve orta sıcaklık değerine sahip kaynakları (100-180 °C) kullanmaktadır.

Elektrik üretimi için kullanılan bu metodolojiden farklı olarak diğer bir yöntemde yüksek sıcaklıkların kullanılması yerine düşük sıcaklığa sahip kaynaklar savunulmaktadır. Bu kaynaklardan elektrik üretimi için organik akışkanlar kullanılmaktadır. Organik akışkanların, düşük sıcaklık değerine sahip buharlı güç çevrimine Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ismi verilmektedir. ORÇ yönteminin

kullanılmasında küresel ısınmanın düşük değerde çevresel etkilerinin diğer kaynaklara göre çok daha düşük etkinliği olduğu söylenmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda teknolojinin ilerlemesi ile ilerleyen zamanlarda elektrik üretiminde ORÇ metodunun kullanılması öngörülmektedir.

2.4.1 Kuru Buhar Sistemi

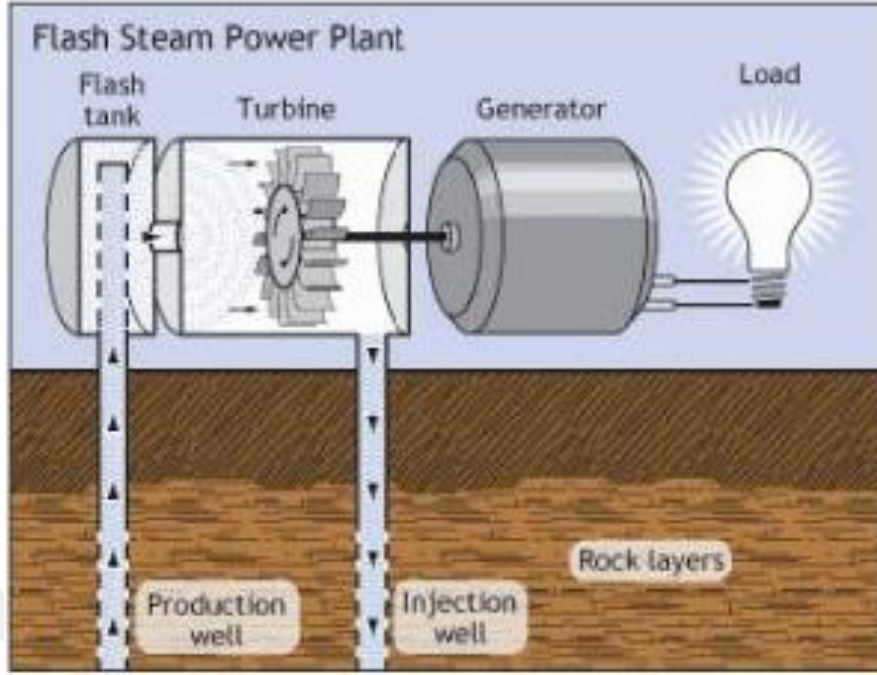
Kuru buhar sistemi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir enerji dönüşüm sistemidir. Bu sistemde, su buharı enerjisi kullanılarak mekanik enerji üretilir. Kuru buhar sistemi Şekil 2.2’de görüldüğü gibi genellikle buhar türbinleri ve jeneratörlerin bir kombinasyonunu içerir. İlk adımda, genellikle bir kazan veya buhar jeneratörü kullanılarak su buharına dönüştürülür. Buhar, yüksek basınç ve sıcaklıkta üretilir ve bir boru sistemi aracılığıyla buhar türbinine yönlendirilir. Buhar türbini, yüksek hızda dönen bir rotor içerir. Buhar, türbinin rotoruna giren bir nozul veya kanatçık sistemi aracılığıyla yönlendirilir, bu da türbinin dönmesini sağlar. Türbinin rotorundaki dönme hareketi, mekanik enerjiyi oluşturur. Türbinin çıkışında, mekanik enerji genellikle bir jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratör, dönen hareketi elektrik enerjisine çevirmek için manyetik alanlar kullanır. Bu şekilde, kuru buhar sistemi, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik üretimini sağlar. Kuru buhar sistemleri suyun yenilenebilir kaynak olması nedeni ile enerji üretimi için etkili bir seçenek olarak kabul edilir.



Şekil 2.2 Kuru buhar sisteminin temel çalışma prensibi (İnt. Kyn. 6).

2.4.2 Flaş Buhar Sistemi

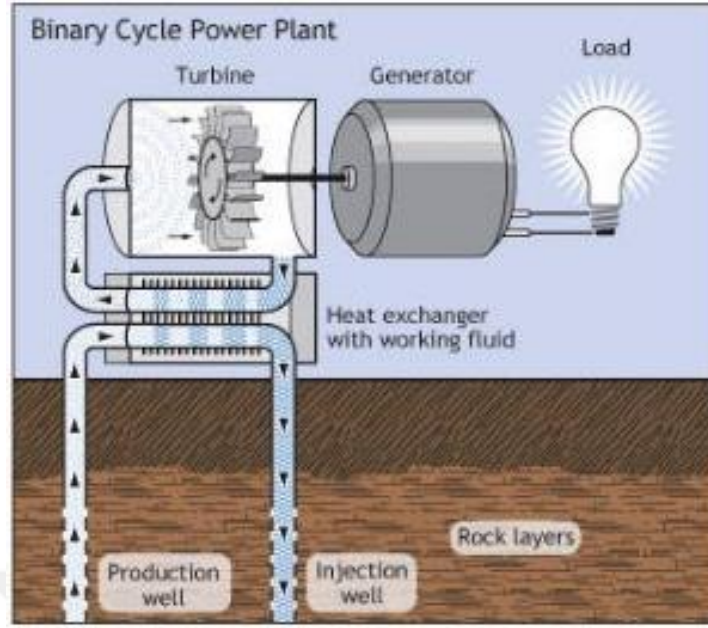
Flaş buhar sistemi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir enerji dönüşüm sistemidir. Bu sistemde, yüksek basınçlı sıvı aniden düşük basınçlı bir ortama genişler ve bu genişleme işlemiyle birlikte buhar oluşur. Bu oluşan buhar, mekanik veya elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilir. Flaş buhar sistemi, genellikle yüksek basınçlı sıvıyı düşük basınçlı bir ortama genişletmek için kullanılan bir valf veya nozul içerir. Bu genişleme işlemi, sıvının içerisinde çözünmüş olan gaz fazının aniden buharlaşmasına neden olur. Bu durum, sıvıdaki basınç enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmesine ve buharın oluşmasına yol açar. Oluşan buhar genellikle türbinler aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Buhar, yüksek hızda dönen bir türbin rotoruna yönlendirilir. Bu dönme hareketi, türbindeki rotorun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Mekanik enerji daha sonra bir jeneratör tarafından elektrik enerjisine çevrilir. Flaş buhar sistemi, enerji dönüşümü için verimli bir yöntem olarak kabul edilir çünkü yüksek basınçlı sıvının genişlemesi sırasında potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülür. Bu sistem, özellikle termal enerjiye sahip atık veya yan ürünlerin değerlendirilmesi gibi uygulamalarda kullanılabilir. Ancak, flaş buhar sistemlerinin tasarımı ve işletimi karmaşık olabilir. Yüksek basınçlı sıvının ani genişlemesi, bazı zorlukları beraberinde getirebilir ve sistemde basınç ve sıcaklık kontrolü önemlidir. Ayrıca, sistemin verimli çalışması için uygun ekipman ve bakım gereklidir. Şekil 2.3’de flaş buhar sisteminin temel çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.3 Flaş buhar sisteminin temel çalışma prensibi (İnt. Kyn. 6).

2.4.3 İkili Döngü Sistemi

Jeotermal sistemlerde ikili çevrim (binary cycle), jeotermal kaynaklardan elde edilen ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan bir teknolojidir. Bu çevrim, Organik Rankine Çevrimi (ORC) olarak da adlandırılır. İkili çevrim, jeotermal sıcak su veya buharın doğrudan ORC sisteminde kullanılamayacak kadar yüksek sıcaklıkta olması durumunda tercih edilir. Bu durumda, jeotermal sıcaklıkta çalışamayan organik bir çalışma akışkanı kullanılarak ikili bir döngü oluşturulur. İkili çevrim, jeotermal kaynaklardan düşük sıcaklıkta (genellikle 80°C ila 150°C arasında) ısı elde edilmesi durumunda etkilidir. Yüksek verimlilik, çevresel uyumluluk ve düşük kaynak sıcaklıklarında çalışabilme yeteneği gibi avantajları vardır. Organik Rankine Çevrimi gibi, ikili çevrim de düşük sıcaklıkta çalışan organik çalışma akışkanları kullanır. Bu akışkanlar, düşük kaynama noktaları ve iyi buharlaşma özellikleri nedeniyle bu uygulamalar için uygun seçeneklerdir. Jeotermal sistemlerde ikili çevrim, düşük sıcaklıkta çalışan jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu, daha geniş bir jeotermal potansiyelin kullanılmasını sağlar ve daha düşük sıcaklıklarda enerji elde edebilme yeteneğine sahiptir. Şekil 2.4’de ikili döngü sisteminin temel çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.4 İkili döngü sisteminin temel çalışma prensibi (İnt. Kyn. 6).

2.5 Jeotermal Kullanım Alanları

Jeotermal enerji sonucunda ortaya çıkan termal su ve buharın sıcaklığı 20°C ile 400°C arasında bulunabilmektedir. Bu termal sular düşük, orta ve yüksek sıcaklık olmak üzere üç kısımda toplanmaktadır. Jeotermal enerji sıcaklık seviyesine göre kullanılmaktadır. Günümüzde jeotermal enerjinin çok sayıda kullanımı vardır. Çizelge 2.1’ de belirli sıcaklıklardaki jeotermal enerjinin kullanımı görülmektedir.

Çizelge 2.1 Belirli sıcaklıklara göre jeotermal enerjinin kullanım alanları (Atalay 2004).

Sıcaklık (°C)	Kullanım Alanları
180	Yüksek konsantrasyonlu solüsyonların buharlaştırılması, elektrik üretimi
170	Diatomitlerin kurutulması, ağır su ve hidrojen sülfid eldesi
160	Kereste kurutmacılığı, balık kurutmacılığı
150	Bayer’s metodu ile alüminyum eldesi
140	Konservecilik, çiftlik ürünlerinin çabuk kurutulması
130	Şeker endüstrisi, tuz endüstrisi
120	Distilasyonla temiz su eldesi
110	Çimento kurutmacılığı

100	Organik maddeleri kurutma, yün yıkama ve kurutma
90	Balık kurutma (stok balık)
80	Yer ve sera ısıtmacılığı
70	Soğutma (Alt Sıcaklık Limiti)
60	Sera, ahır ve kümes ısıtmacılığı
50	Mantar yetiştirme, balneolojik hamamlar
40	Toprak ısıtma
30	Yüzme havuzları, fermentasyonlar, damıtma
20	Balık çiftlikleri

2.6 Jeotermal Enerjinin Avantajları

- Jeotermal enerji tükenmeyen, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır.
- Kendi özvarlığıdır ve doğal bir kaynaktır.
- Çok amaçlı ısıtma aktiviteleri için idealdir (tarım, sera, konut).
- Fosil ve diğer alternatif enerji kaynaklarına göre daha ucuzdur.
- Jeotermal enerji türü güvenilirdir.
- Sistem kolay ve hızlı bir şekilde devreye alınabilir.
- Jeotermal enerji verimliliği %95'in üzerindedir.
- Diğer enerji türlerinde olduğu gibi rüzgâr ve yağmur gibi meteorolojik koşullardan bağımsız üretimi yapılabilmektedir.
- Ülkemizde jeotermal enerji kaynaklarının fazla bulunması neticesinde yerli teknoloji ile bu kaynaklar kullanıma sürülerek yerli üretim artırılabilir.

2.7 Jeotermal Enerjinin Dezavantajları

- Jeotermal kaynakların gelişim maliyetleri birçok faktöre göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, kazının büyük olması güçlü sondaj makinelerini gerektirebilir. Diğer bir durum olarak kayaçların çok sert olması ya da yüksek sıcaklık gibi durumlarda da maliyet etkilenebilmektedir.
- Bir diğer olumsuz faktör kaynağın kullanılacak alana uzak olması, özel bir tekniğin oluşturulmasına neden olmaktadır.

- Jeotermal alanlar çevrede gürültü kirliliğine yol açabilir. Bu alanlardaki gürültü 120 desibeli aşabilmektedir. Bu tür durumlarda gürültü susturucu olarak isimlendirilen atmosferik separatörler ile gürültü 85 desibele düşürülebilir.
- Jeotermal alanlarda ortaya çıkan atık sulardaki bor vb. kimyasallar bitkilere zarar verebilmektedir.
- Jeotermal santraller işlenirken yeraltından su çekilmesi göçme gibi tehlikelere sebep olabilmektedir. Bunun yanısıra suyun çekilmesi veya yeraltına enjekte edilmesi durumunda deprem oluşma ihtimali artabilmektedir (Erkul 2012).
- Jeotermal enerji sonucunda elektrik elde edilen sistemlerin dönüşüm verimlilikleri düşük olduğu için çevreye büyük miktarda atık su bırakılmaktadır. Aynı şekilde atık ısı, geniş bir alana yayılarak bulut oluşumlarını etkileyerek iklimlerde değişiklik yapabilmektedir.

2.8 Jeotermal Alanların Araştırılması

Jeotermal alanların araştırılması; potansiyel jeotermal kaynakların tespit edilmesi, rezervuar özelliklerinin belirlenmesi ve enerji üretimine uygunluğunun değerlendirilmesi süreçlerini içermektedir. Jeotermal alanların araştırılmasına ait adımlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Jeolojik Araştırma: Jeotermal alanların araştırılması, jeolojik çalışmalarla başlar. Bölgenin jeolojik yapısı, volkanik faaliyetler, tektonik hareketler ve hidrotermal sistemler gibi faktörler değerlendirilir. Yüzeydeki jeolojik belirtiler, sıcak su kaynakları, fumaroller, jeotermal gömlekler gibi ipuçlarına dikkat edilir.
- Jeofizik Araştırma: Jeotermal alanların araştırılması için jeofizik yöntemler kullanılır. Yer altında jeotermal rezervuarların varlığını ve özelliklerini belirlemek için gravite, manyetik, elektromanyetik ve ses dalgaları gibi jeofizik teknikler uygulanır.
- Jeokimyasal Analizler: Jeotermal alanların araştırılmasında jeokimyasal analizler büyük önem taşır. Sıcak su ve buhar örneklerinin kimyasal bileşimi, mineral içeriği, izotop kompozisyonu ve diğer parametreler incelenerek jeotermal rezervuarın karakteristiği ve su kaynağının kaynağı hakkında bilgi elde edilir.

- Kuyu Sondajları: Jeotermal alanların araştırılmasında kuyu sondajları yapılır. Sondajlar, derinliklerdeki sıcak su veya buharın doğrudan örneklenmesi ve rezervuarın derinliği, sıcaklık, basınç ve verimliliği gibi bilgilerin elde edilmesini sağlar. Bu aşamada, termal sondajlar ve jeotermal kuyu testleri gerçekleştirilir.
- Ekonomik Değerlendirme: Jeotermal alanların araştırılmasının son aşaması, elde edilen verilerin ekonomik değerlendirilmesidir. Potansiyel enerji üretimi, jeotermal kaynakların kullanım alanları, maliyetler ve gelir beklentileri gibi faktörler dikkate alınarak projenin ekonomik ve finansal sürdürülebilirliği değerlendirilir. Jeotermal alanların araştırılması, enerji potansiyelini belirlemek ve jeotermal enerji projelerinin geliştirilmesine temel oluşturmak için önemlidir. Bu süreçte, uzman ekipler, jeolojistler, jeofizikçiler, kimyagerler ve mühendisler arasında iş birliği yapılır. Jeotermal alanların doğru bir şekilde araştırılması, enerji kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar.

2.9 Dünyadaki Jeotermal Enerji Kaynakları

İnsanoğlunun yaşam kalitesini doğrudan etkileyen ve ihtiyaçlarını karşılamak için gerçekleştirilen üretim sürecinin en önemli girdisi enerjidir. Endüstri Devriminin yaşanmasından günümüze dünyanın nüfusu sekiz katına çıkmıştır. Bunun yanında endüstride yaşanan üretimin yüz kat artması enerji talebini artırmaktadır ve Dünya üzerinde doğal enerji kaynaklarına karşı gösterilen ihtiyaç gün geçtikçe çoğalmaktadır. Günümüzde fosil yakıtlardan enerji üretimi sonucunda ortaya çıkan çevre sorunları tüm ülkeler için bir sorun olarak en üst sıralarda yer almaktadır.

Jeotermal enerji başlangıçta sağlık amaçlı olarak doğal sıcak su kaynakları 1827 yılında İtalya'da asit borik elde etmek için kullanılmıştır. İlerleyen süreçte İtalya'da yine ilk defa jeotermal buhardan elektrik üretimine başlanmış ve 1912 yılında 250kWh gücü olan ilk turbo jeneratör kurulmuştur. 1930 yılında bu enerji İzlanda'da ısınma amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. 1949 yılında Yeni Zelanda bölgesinde bir otelin sıcak su ihtiyacını karşılamak için açılan sondajlar daha sonra elektrik üretimi için kullanılarak 1954 yılında 200MWe kapasiteli bir santral kurulmuştur. 1960 yılında Amerika'da 1961 yılında Meksika'da 1966 yılında ise Japonya'da santraller kurulması jeotermal enerjinin

kullanımını dünya çapında artırmıştır. Dünyada 1955-2000 yılları arasında jeotermal enerji ile elektrik üretiminde %17 artış yaşanırken, jeotermal enerjinin elektrik üretimi dışındaki uygulamalarda kullanımında %87 artış yaşanmıştır.

Jeotermal enerji, dünya genelinde sürdürülebilir enerji dönüşümüne katkıda bulunan bir kaynaktır. Birçok ülke, jeotermal enerji potansiyelini keşfetmek, kaynakları geliştirmek ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak için jeotermal projelere yatırım yapmaktadır. Aynı zamanda, jeotermal enerji alanında araştırmalar ve teknolojik gelişmeler devam etmektedir.

Türkiye 3488 MWt doğrudan kullanım kapasitesi ile dünyanın 5. Ülkesi konumuna gelmiştir. Çizelge 2.2 ile dünyadaki jeotermal kaynaklı kurulu güç ve üretim değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 Dünyadaki jeotermal kaynaklı kurulu güç ve üretim değerleri (2020 yılı verileri).

MWt		TJ/yıl	
Çin	(40,610)	Çin	(443,492)
ABD	(20,713)	ABD	(152,810)
İsveç	(6,680)	İsveç	(62,400)
Almanya	(4,806)	Türkiye	(54,584)
Türkiye	(3,488)	Japonya	(30,723)

2.10 Türkiye'deki Jeotermal Enerji Kaynakları

Türkiye, dünyanın jeotermal enerji potansiyeli en yüksek ülkelerinden birisidir. Türkiye'de jeotermal enerji kaynakları, aktif tektonik yapısı ve volkanik bölgeleri nedeniyle zengindir. Türkiye'de tahmin edilen jeotermal enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Jeotermal kaynakların çoğu, Batı Anadolu, Orta Anadolu, Marmara Bölgesi, Ege Bölgesi ve Doğu Anadolu gibi bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ülke genelindeki tahmini jeotermal enerji potansiyeli yaklaşık 31 GW elektrik üretim kapasitesine eşdeğerdir

Türkiye, jeotermal enerji kaynaklarına sahip olmasının avantajını kullanarak sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Jeotermal enerji, ülkenin enerji ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir potansiyele sahip olup, çevresel ve ekonomik faydalar sağlamaktadır.

KARADENİZ

AK DENİZ

YUNANISTAN **BULGARISTAN** **GÜRCÜSTAN** **ERMENİSTAN** **İRAN** **İRAK** **SURİYE**

İSTANBUL **TEKİRDAĞ** **EDİRNE** **BURSA** **ESKİŞEHİR** **KÜTAHYA** **AFYON** **İZMİR** **AYDIN** **DENİZLİ** **ANTALYA** **MERSİN** **HATAY** **TRABZON** **KARS** **ERZURUM** **AGRI** **ERZİNCAN** **MUŞ** **VAN** **DİYARBAKIR** **KONYA** **ANKARA** **YOZGAT** **NEVŞEHİR** **KIRŞEHİR** **KAYSERİ** **SİVAS** **Elbistan** **DOĞU ANADOLU FAYI**

KUZAY ANADOLU FAYI **Havza**

ÖLÇEK 0 50 100 km

AÇIKLAMALAR

- ▲ Önemli Jeotermal Alanlar İçmece
- Sıcak Su Kaynakları Maden Suyu
- Ü. Tersiyer-Kuvaterner Volkanitleri
- Ü. Tersiyer-Kuvaterner Volkan Çıkışları
- Ana Fay Hatları
- Başlıca Doğrultu Atımlı Faylar
- ▽ Ters Fay ve Bindirmeler

Şekil 2.5 Türkiye jeotermal kaynaklar ve volkanik alanlar haritası (İnt. Kyn. 7).

Ülkemizdeki jeotermal kaynaklar incelendiğinde jeotermal kaynak potansiyelinin teorik olarak 31.500 MWt olduğu tahmin edilmektedir (Yılmaz 2012). Sıcaklık değeri 40°C'nin üzerinde olan 170'e yakın jeotermal saha bulunmaktadır. Bu sahalardan 11 tanesi yüksek sıcaklık değerine sahip olup ilk olarak elektrik üretiminde değerlendirilecek sahalardır. Aydın-Germencik (232 °C), Manisa- Salihli-Göbekli (182 °C), Çanakkale-Tuzla (174 °C), Aydın-Salavatlı (171 °C), Kütahya-Simav (162 °C), İzmir-Seferihisar (153 °C), Manisa-Salihli-Caferbey (150 °C), Aydın-Yılmazköy (142 °C), İzmir-Balçova (136 °C), İzmir-Dikili (130°C).

Türkiyedeki jeotermal kaynakların bölgesel olarak dağılımı Çizelge 2.3'te görülmektedir. Çizelge 2.3'te de görüldüğü gibi ilk sırada yer alan Ege bölgesi jeotermal faaliyetlerde yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar neeticesinde kaynağın sıcaklık değerleri diğer bölgeler ile karşılaştırıldığında Ege bölgesi elektrik üretimi için daha elverişlidir. Bu sebeple jeotermale dayalı elektrik üretiminin önemli bir kısmı Ege bölgesinde yoğunlaşmıştır. Jeotermal enerjiye bağlı olarak kurulmuş olan elektrik üretim santralleri Büyük Menderes ve Gediz Grabeninin yüksek rezervuar sıcaklıklarına sahip alanları seçmişlerdir. Bu bölgelerde yer alan yüksek rezervuarlı sıcaklıklar oldukça zengindir. Bu nedenle bu bölgelere jeotermal santraller fazla kurulmuştur.

Çizelge 2.3 Jeotermal potansiyelin bölgelere göre dağılımı.

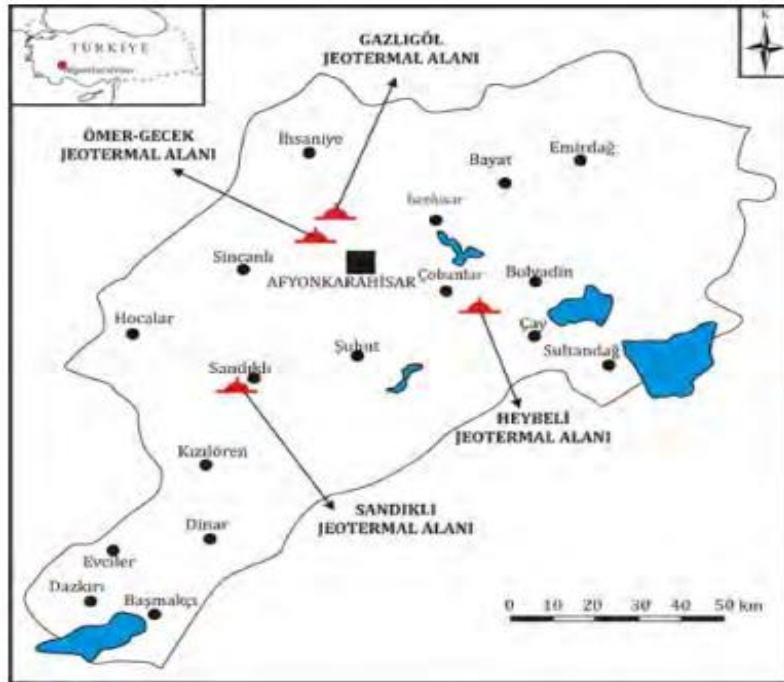
Bölge	Jeotermal Potansiyellerin Dağılımı (%)
Marmara Bölgesi	12,8
Karadeniz Bölgesi	1,9
Doğu Anadolu Bölgesi	2,5
Ege Bölgesi	66,7
İç Anadolu Bölgesi	15,2
Akdeniz Bölgesi	0,7
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	0,2

2.11 Afyonkarahisar İlindeki Jeotermal Enerji Kaynakları

Afyonkarahisar iline ait jeotermal alanlar düşük sıcaklık değerine sahip jeotermal alanlar arasında geçmektedir. Orta ve düşük sıcaklık değerindeki jeotermal enerji

kaynakları (150°C 'nin altında), konut ve sanayi sektöründe doğrudan ısı enerjisi olarak kullanılabilir. Jeotermal enerji kaynağından sağlanan ısı enerjisi fosil yakıt kaynaklarından sağlanan ısı enerjisine göre daha ucuz ve emisyon değeri sıfıra yakın olduğu için konutların ısınmasında oldukça avantajlıdır.

Jeotermal enerji açısından Afyonkarahisar ili zengin bir yapıdadır. Afyonkarahisar ilinin sınırları içerisinde “Ömer-Gecek”, İhsaniye ilçesinde “Gazlıgöl”, Sandıklı ilçesinde “Hüdaî” ve Bolvadin ilçesinde “Heybeli” olmak üzere dört jeotermal kaynağı ile Türkiye’nin ikinci büyük jeotermal sahasıdır (Akan ve Süer 2009). Afyon iline ait jeotermal alan haritası Şekil 2.6’da görülmektedir. Bu jeotermal sahaların sıcaklık değerleri ortalama 30°C 'nin üzerindedir. Afyonkarahisar ilindeki jeotermal kaynaklar içerisinde Ömer-Gecek sahasında 3 adet kaynak 25 adet kuyu, Heybeli sahasında 4 adet kaynak 8 adet kuyu, Sandıklı sahasında 1 adet kaynak 10 adet kuyu, Gazlıgöl sahasında ise 4 adet kaynak 4 adet kuyu bulunmakta olup toplamda 12 adet kaynak ve 47 adet kuyu bulunmaktadır. Afyonkarahisar ilindeki bu sahaların bölge turizmine katkısı oldukça büyüktür. Bu nedenle bu sahalardaki kuyuların daha kontrollü ve verimli işletilmesi amacıyla AFJET (Afyon Jeotermal Isıtma Tesisleri) kurulmuştur.



Şekil 2.6 Afyonkarahisar ili jeotermal alan haritası (Demir ve Memiş 2015).

Afyonkarahisar ilinde birçok kaplıca bulunmaktadır bu nedenle Afyonkarahisar iline “kaplıca şehri” denilebilir. Afyonkarahisar konum olarak doğuyu batıya, kuzeyi güneye bağlayan bir yapıya sahip olduğundan ötürü jeotermal kaynaklar Afyonkarahisar ilinin gelişimine katkıda bulunacaktır.

2.11.1 Ömer-Gecek Jeotermal Alanı

Ömer-Gecek jeotermal alanında üç adet jeotermal kaynak bulunmaktadır. Bu alanlardan elde edilen sıcak su kaynakları çoğunlukla Afyonkarahisar ilinde bulunan kaplıcalarda, ayrıca otellerde, villalarda ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölgede 1971 ile 1996 yılları arasında 25 adet kuyu açılmış olup bunlardan 21 tanesi artezyen, 1 tanesi gayzer ve 3 tanesi ise kullanım dışında görev yapmaktadır.

2.11.2 Heybeli Jeotermal Alanı

Heybeli jeotermal alanı Afyonkarahisar-Konya karayolunun 27 kilometresinde bulunmakta olup bu sahada toplam üç adet jeotermal kaynak bulunmaktadır. Heybeli jeotermal bölgesi ortalama ve 33°C sıcaklık 0.83l/s debiye sahiptir. Heybeli bölgesinde 8 adet kuyu bulunmakta olup bu kuyular bölgede varolan üç hamam, bir büyük havuz ve otel ve fazla oranda bulunan devre mülk sıcak su kaynağı ile beslenerek turizme katkı sağlamaktadır.

2.11.3 Sandıklı Jeotermal Alanı

Sandıklı jeotermal alanı Afyonkarahisar-Antalya karayolunun 65. km’ sinde yer almaktadır. Bu jeotermal alanı Sandıklı bölgesinde yer almakta olup Hüdai kaplıcaları burada bulunmaktadır. Bu kaynak bölgesinin sıcaklık değeri ve 45-70°C olup toplam 10 adet kuyu bulunmaktadır. Bu bölgedeki sıcak su kaynağı termal turizm ve bölgedeki konutların ısınmasında kullanılmaktadır. Sandıklı jeotermal bölgesinin kontrolü SANJET (Sandıklı Jeotermal Enerji Tesisi) tarafından yapılmaktadır.

2.11.4 Gazlıgöl Jeotermal Alanı

Gazlıgöl jeotermal alanı Afyonkarahisar-Eskişehir karayolunun 20. Km'sinde yer almaktadır. Bu bölgedeki kaynakların sıcaklık değeri ortalama 38-58°C olup debileri 0.5-1.5l/s arasında değişen 4 adet kaynak ve 4 adet sıcak su sondajı bulunmaktadır.

2.12 AFJET (Afyonkarahisar Jeotermal Enerji Tesisleri)

Afyonkarahisar Jeotermal Enerji Tesisleri, Afyonkarahisar İl Özel İdaresi, Afyonkarahisar Belediyesi, Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası, YÜNTAŞ AŞ, Afyonkarahisar Eğitim Vakfı, Afyonkarahisar Esnaf ve Sanatkârlar Birliği ve Afyonkarahisar Ticaret Borsasının bir araya gelmesi ile 1994 yılında kurulmuştur. AFJET Afyonkarahisar bölgesinde bulunan jeotermal kaynakların kontrol edilerek verimli bir şekilde çalışması için kurulmuştur. AFJET'in görevleri arasında su kaynakları ile ısıtma ve termal su dağıtım tesisleri kurmak ve jeotermal alanlarda projeler üretmek bulunmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Termodinamik Analiz

Termodinamik analiz, sistemlerin performansını ölçmek, verimsizlikleri hesaplamak ve belirlemek ve sistem performansını artırmak için kullanılır. Bu analiz kütle, enerji, entropi ve ekserji dengelerini kapsar. Enerji analizi, termodinamiğin birinci yasasının temel ilkesine dayanır ve bir sistem içindeki enerji dönüşümlerinin, değişimlerinin ve girdi-çıktılarının hesaplanmasını sağlar. Sistemdeki enerji çıkışı, atık ve faydalı enerji olarak sınıflandırılır ve faydalı enerji miktarı ile giriş enerjisi arasındaki karşılaştırma, sistem bileşenlerinde meydana gelen verimsizlikleri belirleyerek enerji analizinin özünü oluşturur.

Enerji analizi, sistemin ideal duruma ne kadar yaklaştığına dair bilgi sağlamaması nedeniyle bir sınırlamaya sahiptir. Ayrıca sistemde meydana gelen termodinamik kayıpların doğru olarak belirlenmesinde çok etkili değildir. Öte yandan, termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji analizi, verimsizliklerin büyüklüğünü, yerini ve nedenlerini belirlemek için kullanılır. Ekserji, enerjinin kullanılabilir kısmını veya iş yapabilen kısmını ifade eder ve nicelikten çok niteliği vurgular. Ekserji analizi, enerjinin var edilemeyeceğini veya yok edilemeyeceğini ancak kalitesinin zamanla düşebileceğini ve sonunda çevre ile dengeye ulaşarak iş yapamaz hale gelebileceğini kabul eder (Dincer ve Rosen 2007). En genel senaryoda denge denklemi, süreç içindeki miktarlardaki değişiklikleri ifade eder:

$$Girdi + Üretim - Çıktı - Tüketim = Toplam birikim \quad (3.1)$$

Hesaplama bir prosesteki toplam birikimin sisteme giren ve sistemde üretilen miktarların toplamından sistemden çıkan ve sistemde tüketilen miktarların çıkarılmasıyla yapılmaktadır. Durgun hal şartlarında Denklem (3.1)'deki toplam birikim sonucu sıfırdır çünkü zamanla prosesteki tüm özellikler değişmemektedir.

3.1.1 Kütle Balansı

Kütle dengesi, termodinamik sistemin analizinde kullanılan temel bir ilkedir. Genel olarak sistemler açık veya kapalı olarak kategorize edilir. Açık sistemler kütle, ısı ve iş etkileşimlerini içerirken, kapalı sistemler ısı ve iş etkileşimlerini içerir. Denklemler, kütle girişi, ısı girişi ve iş çıkışı için pozitif değerleri ifade eder. Açık sistem veya kontrol hacmi durumunda, kütle dengesi şu şekilde ifade edilir:

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = \frac{dm_{kh}}{dt} \quad (3.2)$$

burada, $\dot{m}_g$ giren kütle akışını, $\dot{m}_\zeta$ çıkan kütle akışını, alt indis kh de kontrol hacmini ifade etmektedir. Durgun hal koşulları için kütle akış dengesi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (3.3)$$

3.1.2 Enerji Balansı

Sistem içindeki ele alınan prosesin enerji balansı termodinamiğin birinci yasasına göre her zaman korunmaktadır. Tüm enerji türlerinin toplamı İzole bir sistemde sabittir. Kontrol hacmi için enerji balansı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$\dot{Q} - \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) = \frac{dE_{kh}}{dt} \quad (3.4)$$

burada $\dot{Q}$ ve $\dot{W}$ sırasıyla ısı ve iş transfer oranları, h spesifik entalpi, v hız, g yerçekimi ivmesi, z yükseklik ve E ise kontrol hacminde elde edilen enerjidir.

Potansiyel ve kinetik enerji etkilerinin ihmalinde durgun hal durumları için enerji balansı denklemi aşağıdaki gibidir. Tüm giren enerjilerin toplamının çıkan enerjilerin toplamına eşit şekilde olmaktadır;

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (3.5)$$

3.1.3 . Entropi Balansı

Herhangi bir kontrol hacmi için entropi üretim oranı ya da entropi balansı şu şekildedir;

$$\dot{S}_{\text{ü}} = \sum \dot{m}_{\text{ç}} s_{\text{ç}} + \sum (\dot{Q}_{\text{ç}}/T_o) - \sum \dot{m}_{\text{g}} s_{\text{g}} - \sum (\dot{Q}_{\text{g}}/T_o) + \frac{dS_{\text{kh}}}{dt} \quad (3.6)$$

burada $\dot{S}$ entropi üretim oranı, s spesifik entropi, S kontrol hacminde elde üretilen entropi ve T_o durgun hal ya da referans sıcaklığıdır. Gerçek proseslerde, sistemden çıkan entropi her zaman sisteme giren entropiden büyüktür. Burada iç tersinmezliklerden kaynaklanan fark entropi üretimi olarak adlandırılmaktadır. Fakat tersinir ya da ideal sistemlerde, entropi üretimi olmadığı için tersinmezlik miktarı sıfırdır.

Durgun hal şartları için entropi balansı oran formu şu şekildedir;

$$\sum \dot{m}_{\text{in}} s_{\text{in}} + \sum (\dot{Q}_{\text{in}}/T_o) + \dot{S}_{\text{gen}} = \sum \dot{m}_{\text{out}} s_{\text{out}} + \sum (\dot{Q}_{\text{out}}/T_o) \quad (3.7)$$

3.1.4 Ekserji Balansı

Son zamanlardaki mühendislik uygulamalarında ekserji analizi, enerjide üretim sistemlerini incelemek için ortaya çıkmıştır. Enerji bir biçimden diğerine dönüştüğünde, her zaman etkin bir şekilde kullanılamayan bir enerji kısmı vardır. Bu kalan kullanılabilir enerji, yararlı iş miktarını temsil eden ekserji olarak adlandırılır. Ekserji analizi, enerji dönüşüm sistemlerinin anlaşılmasında çok önemli bir rol oynar. Sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşim gibi faktörler de dahil olmak üzere ekserji analizinde referans ortamın özelliklerini anlamak çok önemlidir. Bir sistem referans ortamı ile dengeye ulaştığında, ekserji içeriği sıfır olur.

Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci yasasının ilkelerinden yararlanarak, verimlilik ve ekonomi açısından enerji kaynaklarının kullanımını optimize etmek için daha etkili stratejiler ve yöntemler sağlar. Bu tür analiz, termal, güneş ve rüzgar enerjisi sistemleri gibi çeşitli enerji üretim sistemlerine uygulanabilir. Ekserji analizi, sistem içindeki

tersinmezliklerin ve bunların özel konumlarının tanımlanmasını sağlar. Tersinmezlik büyüklüğü ve konumu hakkındaki bu bilgi, genel sistem performansını artırmak için çok önemlidir. Bir maddenin ekserji içeriği tipik olarak; fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserji olmak üzere dört bileşene ayrılır. Yükseklik değişiminin ve işlem hızlarının ihmal edilebilir olduğu durumlarda, kinetik ve potansiyel ekserji göz ardı edilebilir.

Fiziksel ekserji, bir sistem çevre ile etkileşime girdiğinde elde edilebilecek maksimum işi temsil eder. Öte yandan kimyasal ekserji, bir maddenin kendi kimyasal dengesinden saparak farklı bir kimyasal duruma dönüşmesiyle ilişkilidir. Tüm kimyasal değişimlerde ve yanma süreçlerinde rol oynar.

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarından türetilen ekserji dengesi analizi için genel denklem aşağıdaki gibidir:

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_c + \dot{E}x_y \quad (3.8)$$

Sisteme giren ekserjinin toplamı, sistemden çıkan ekserji artı ekserji yıkımının toplamına eşittir. Bu denklem ayrıca, ısı ve işle ilgili ekserji akışlarıyla birlikte, giren ve çıkan akışlar için kütle akış hızlarının ilgili spesifik ekserjilerinin toplamı olarak da ifade edilebilir.

$$\sum_i \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum_e \dot{m}_c ex_c + \dot{E}x_W + \dot{E}x_Y \quad (3.9)$$

Tersinmezlikleri temsil eden ekserji yıkımı, Gouy-Stodola denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Denklemdaki diğer ifadeler, sistemin özgül ekserjisinin yanı sıra ısı transferi ve iş ile ilişkili ekserji akışlarını temsil eder.

$$\dot{E}x_Y = \dot{I} = T_o \dot{S}_{\dot{u}} \quad (3.10)$$

Genel olarak, ekserji analizi, enerji dönüştürme sistemleri hakkında değerli bilgiler sağlar ve performanslarını ve verimliliklerini optimize etmeye yardımcı olur. Denklem (3.9)'daki diğer ifadeler şu şekildedir:

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (3.11)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (3.12)$$

$$ex = ex_{ke} + ex_{pe} + ex_{ph} + ex_{ch} \quad (3.13)$$

burada T_i verilen i numaralı durumun sıcaklığıdır.

3.1.5 Termodinamik Verimlilikler

Enerji ve ekserji verimliliği analizleri, herhangi bir güç üretim sisteminin performansını ve geliştirme olanaklarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için kullanılır. Enerji kaynaklarının yetersiz kaldığı veya azaldığı durumlarda bu kaynakların daha verimli kullanılması zorunluluk haline gelmektedir. Bu nedenle, bu çalışma, kapsamlı değerlendirme ve potansiyel iyileştirmeler sağlamak için sistemin tamamında ve münferit bileşenlerinde enerji ve ekserji verimliliği analizleri yapmaya odaklanmaktadır.

3.1.5.1 Enerji Verimliliği

Prosesin enerji verimliliği (η), sistem tarafından üretilen faydalı olan sisteme giren enerjinin toplam enerjiye oranı olarak tanımlanır. Alternatif olarak, sistem içinde yararlı enerji üretmekten sorumlu bileşenler tarafından elde edilen istenen sonuç olarak tanımlanabilir. Tek bir ürün veren bir sistem olması durumunda, enerji verimliliği aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta = \frac{\text{faydalı enerji çıktı oranı}}{\text{toplam enerji girdi oranı}} = \frac{\dot{E}_{\text{ç,faydalı}}}{\sum \dot{E}_g} \quad (3.14)$$

Bu formülden yola çıkarak Afyonkarahisar ili mevcut ORC sistemi, kojenerasyon sistemi, tri-jenerasyon sistemi ve Multijenerasyon enerji sistemi için enerji verimlilikleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

Çizelge 3.1 Mevcut sistem ve önerilen sistemler için enerji verim denklemleri.

Sistem	Enerji verimi
Afyonkarahisar mevcut ORC	$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_3 h_3}$
Kojenerasyon sistem	$\eta = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ısıtma}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_3 h_3}$
Tri-jenerasyon sistem	$\eta = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ısıtma} + \dot{Q}_{soğutma}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_3 h_3}$
Multijenerasyon sistem	$\eta = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ısıtma} + \dot{Q}_{soğutma} + \dot{m}_{H_2} h_{H_2}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_3 h_3}$

3.1.5.2 Ekserji verimliliği

Bir sistemin performansını bakış açısı ile değerlendirmesi ekserji analizi ile yapılmaktadır. Tüm sistem ve bileşenleri için inceleme yapılmalıdır. Bir prosesin ekserji verimliliği (ψ) sistem tarafından üretilen ekserjinin ($\dot{E}x_{ç,faydalı}$) total ekserji girdisine ($\dot{E}x_{g,toplam}$) oranıyla bulunmaktadır.

$$\psi = \frac{\text{toplam faydalı ekserji çıktı oranı}}{\text{toplam ekserji girdi oranı}} = \frac{\sum \dot{E}x_{ç,toplam}}{\sum \dot{E}x_{g,toplam}} \quad (3.15)$$

Bir proses için ekserji verimliliği aynı zamanda ekserji yıkım oranı kullanılarak da hesaplanabilmektedir;

$$\psi = \frac{\sum \dot{E}x_{ç}}{\sum \dot{E}x_{g}} = \frac{\sum \dot{E}x_{g} - \sum \dot{E}x_{Y}}{\sum \dot{E}x_{g}} = 1 - \frac{\sum \dot{E}x_{Y}}{\sum \dot{E}x_{g}} \quad (3.16)$$

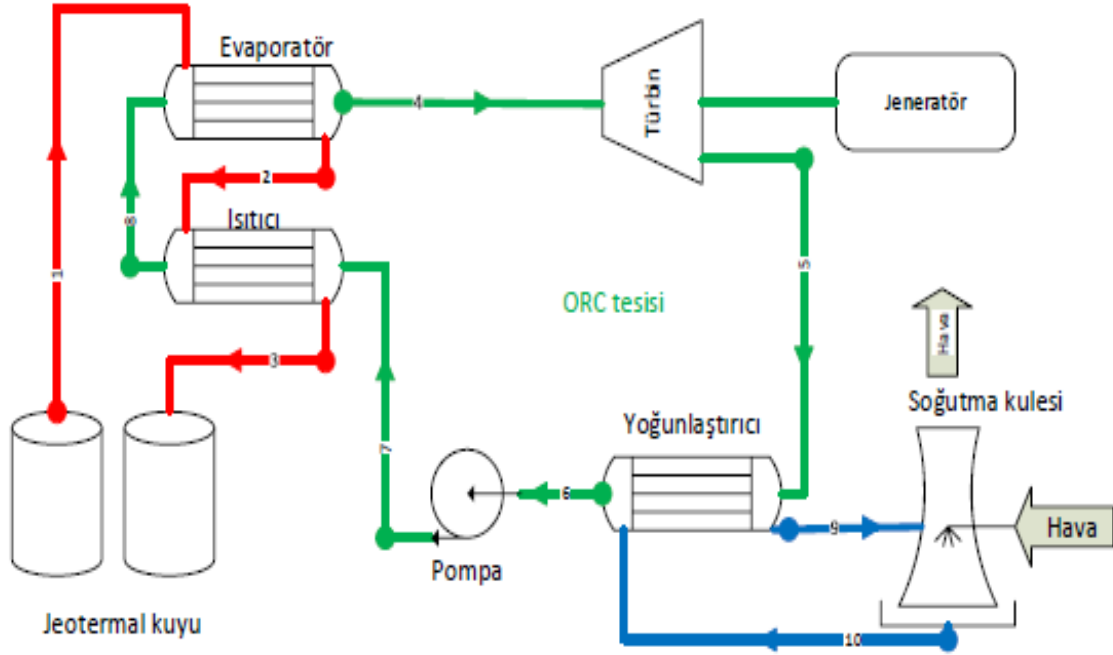
Çizelge 3.2 Mevcut sistem ve önerilen sistemler için ekserji verim denklemleri

Sistem	Ekserji verimi
Afyonkarahisar mevcut ORC	$\psi = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_3 ex_3}$
Kojenerasyon sistem	$\psi = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{ısıtma}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_3 ex_3}$
Tri-jenerasyon sistem	$\psi = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{ısıtma} + \dot{E}x_{soğutma}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_3 ex_3}$
Multijenerasyon sistem	$\psi = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{ısıtma} + \dot{E}x_{soğutma} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_3 ex_3}$

4. BULGULAR

4.1 Sistem Modelleri ve Analizleri

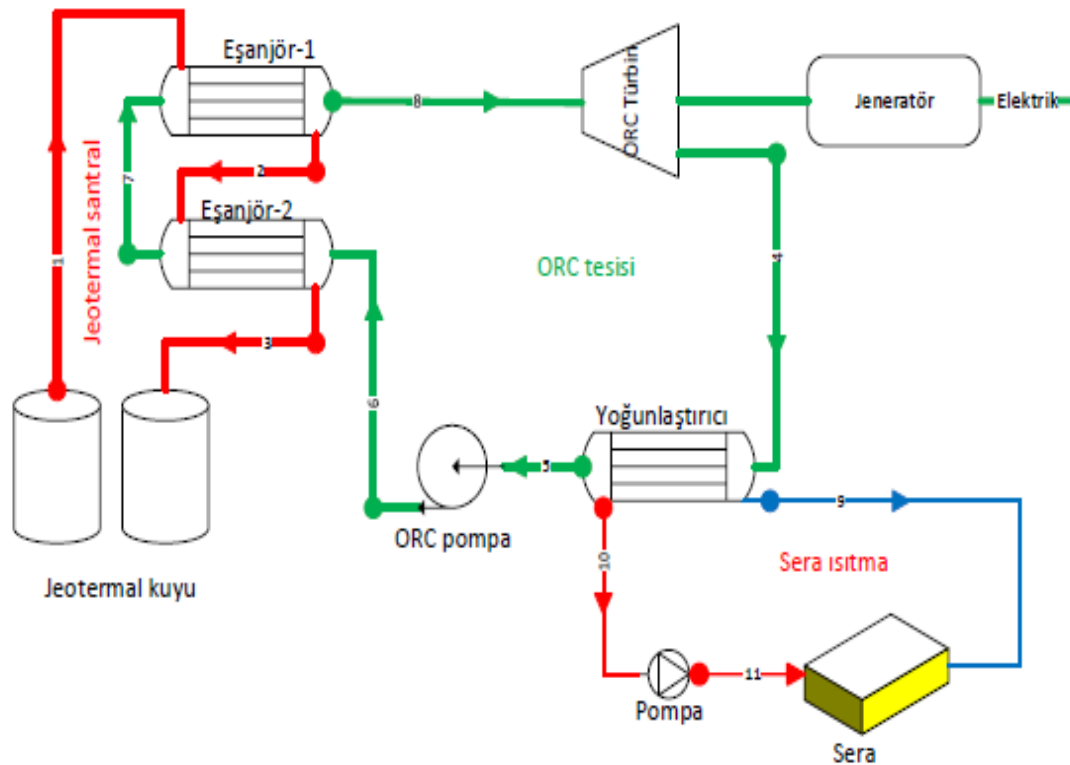
4.1.1 Afyonkarahisar Mevcut ORC Sistemi



Şekil 4.1 Afyonkarahisar ORC sisteminin şematik gösterimi.

Şekildeki sistem, jeotermal kuyudan gelen sıcak suyu kullanarak elektrik üretmek için organik Rankine çevrimi (ORC) kullanan bir güç üretim sistemidir. Sistem, bir jeotermal kuyu, bir pompa, bir evaporatör, bir türbin, bir jeneratör, bir kondenser ve bir yoğunlaştırıcıdan oluşur. Sistem, organik bir akışkan kullanır ve bu akışkanın kaynama noktası suyunkinden daha düşüktür. Akışkan, evaporatörde ısıtılır ve buharlaştırılır. Buhar, türbinde döner ve jeneratörü çalıştırarak elektrik üretir. Türbinden geçtikten sonra, buhar yoğunlaştırıcıda yoğunlaştırılır ve kondenserdeki soğutma suyuna ısı verir. Yoğunlaşan akışkan, pompa tarafından evaporatöre geri pompalanır ve döngü tekrarlanır. Sistemdeki akışkanın basıncı, döngü boyunca değişir ve en yüksek basınç yoğunlaştırıcıda, en düşük basınç ise evaporatörde oluşur.

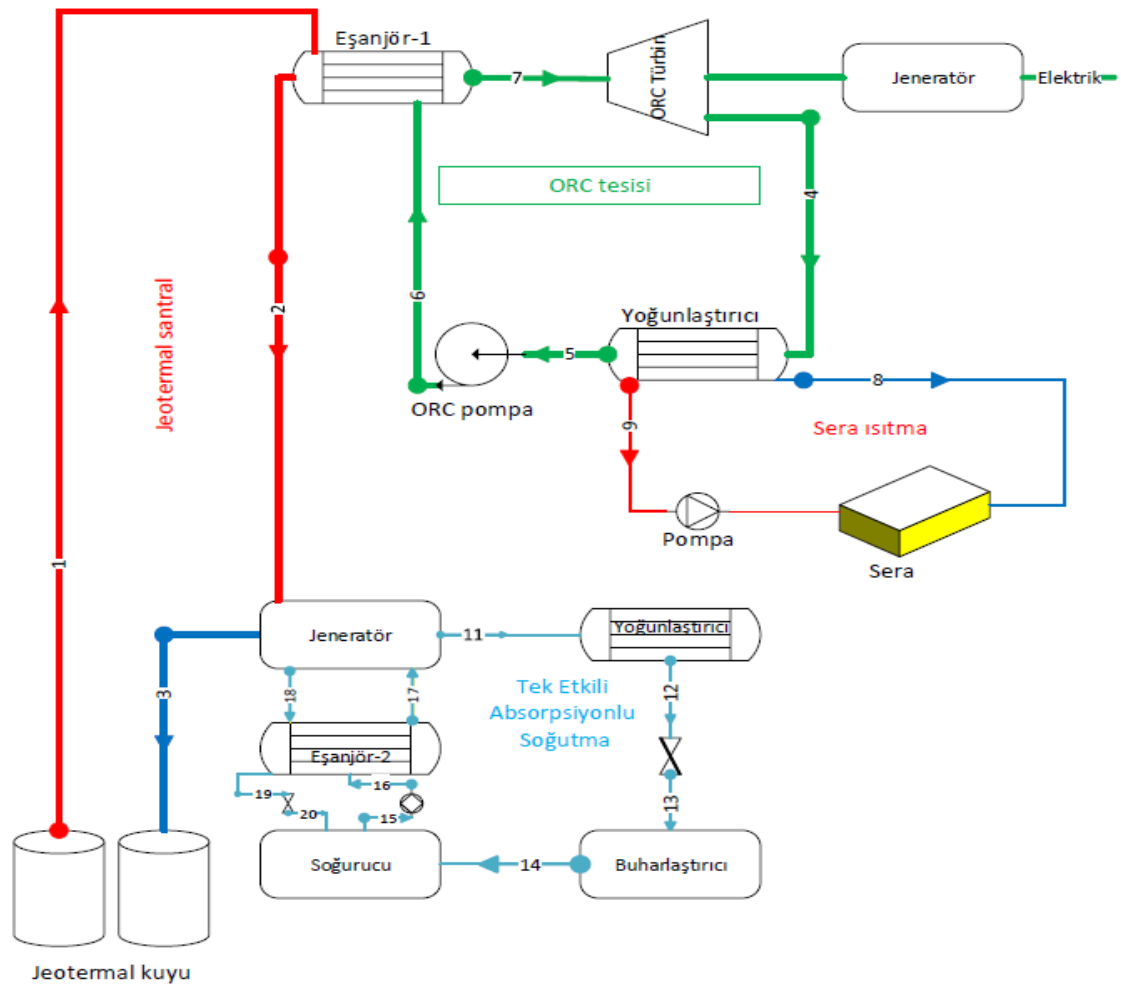
4.1.2 Kojenerasyon Sistemi



Şekil 4.2 Önerilen kojenerasyon sistem.

Şekildeki sistem, bir jeotermal santraldir. Bu santral, jeotermal kuyudan çıkarılan sıcak suyu kullanarak elektrik ve ısıtma enerjisi üretmektedir. Sistemde, ORC Türbin, jeneratör, ORC pompa, yoğunlaştırıcı, eşanjör-1, eşanjör-2, pompa ve sera gibi birçok bileşen bulunmaktadır. Jeotermal kuyudan çıkarılan sıcak su, Eşanjör-1'i geçerek ORC Türbin'e gönderilir. ORC Türbin, bu sıcak suyu kullanarak elektrik enerjisi üretir. Ardından, sıcak su yoğunlaştırıcıda soğutulur ve atık ısı sera ısıtması için kullanılır. Yoğunlaştırıcı, ORC Türbin'den çıkan buharı yoğunlaştırarak tekrar sıvı hale getirir ve pompa tarafından jeotermal kuyuya geri gönderilir. Bu şekilde, sistem sürekli olarak çalışmakta ve hem elektrik hem de ısıtma enerjisi sağlamaktadır

4.1.3 Trijenerasyon Sistem



Şekil 4.3 Önerilen trijenerasyon sistemin şematik gösterimi.

Şekilde 4.3'te verilen trijenerasyon sistemi, aynı anda elektrik, ısı ve soğutma üretmek için üç enerji dönüştürme sürecini birleştirir. Bu durumda, sistem bir Organik Rankine Döngüsü (ORC), bir sera ısıtma sistemi ve bir absorpsiyonlu soğutma sistemi içerir.

Organik Rankine çevrimi (ORC):

ORC, elektrik üretmek için soğutucu akışkanlar veya hidrokarbonlar gibi organik bir çalışma sıvısı kullanan termodinamik bir döngüdür. Bu çalışmada ORC akışkanı olarak R134a kullanılmıştır. Çevrim, geleneksel bir Rankine çevrimine benzer bir şekilde ancak daha düşük sıcaklıklarda çalışır. İşlem aşağıdaki adımları içerir:

Organik çalışma sıvısı, jeotermal akışkanı kullanarak ısıtılır. Isıtılan sıvı buharlaşır ve ORC türbinde genişlererek elektrik üretmek için bir jeneratörü çalıştırır. Genleşmeden sonra sıvı, yoğunlaştırıcıda tekrar sıvı hale getirilerek yoğunlaştırılır. Yoğunlaşan sıvı daha sonra döngüyü tekrarlamak için ısı kaynağına geri pompalanır.

Sera Isıtma Sistemi:

Sera ısıtma sistemi, bir sera veya diğer tarımsal tesisler için ısıtma sağlamak üzere ORC tarafından üretilen atık ısıyı kullanır. Süreç şunları içermektedir:

ORC yoğunlaştırıcısından gelen atık ısı yakalanır. Isı eşanjörü, termal enerjiyi atık ısıdan suya aktarır. Isıtılan sıvı daha sonra borular, radyatörler veya diğer ısıtma mekanizmaları kullanılarak sera boyunca dağıtılır. Isı, sera içinde optimum sıcaklığın korunmasına yardımcı olur, bitki büyümesini destekler ve yetiştirme için uygun bir ortam sağlar.

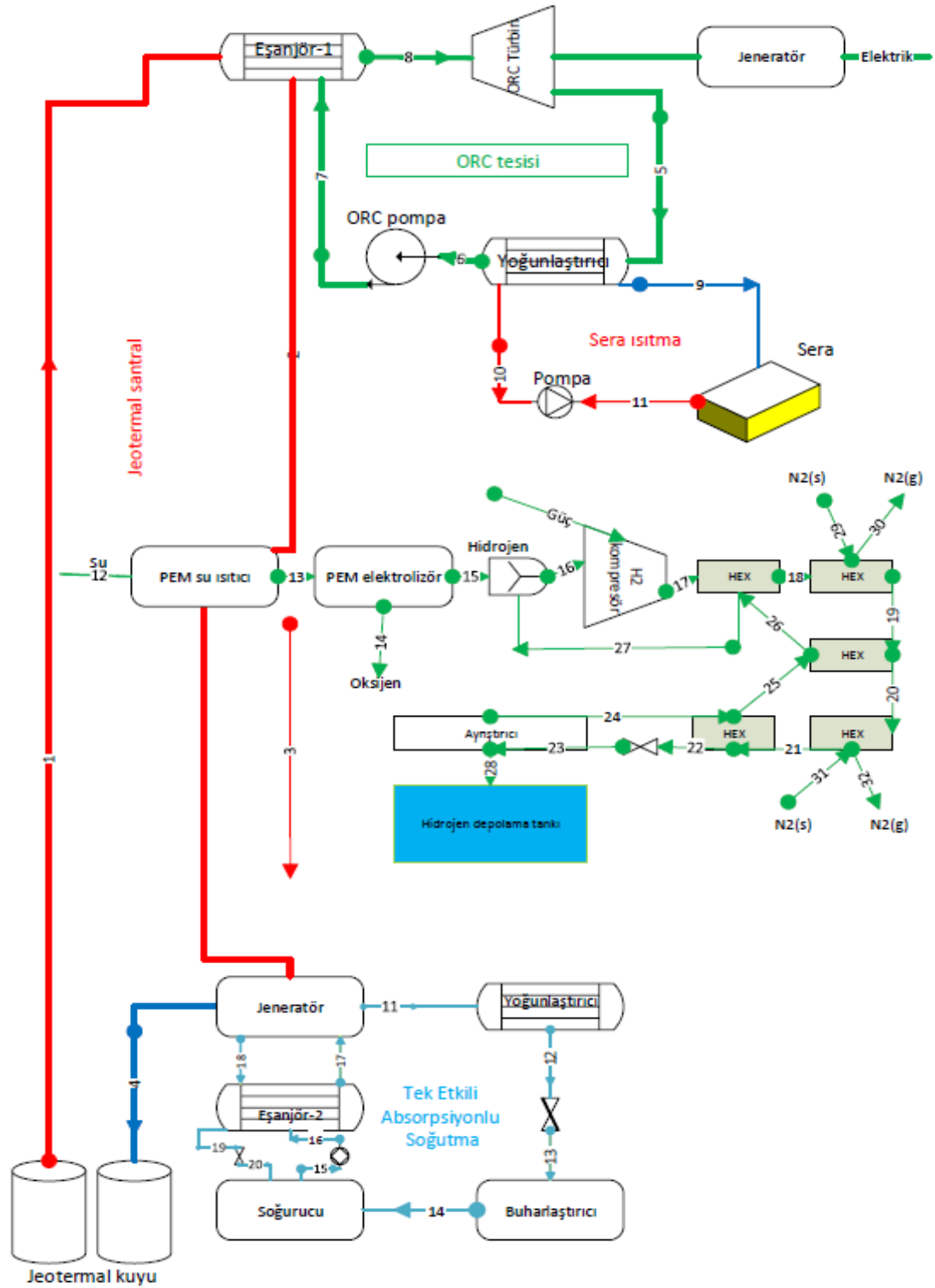
Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi:

Absorpsiyonlu soğutma sistemi, soğutulmuş su veya iklimlendirme sağlayan bir soğutma sürecini yürütmek için ORC'den gelen atık ısıyı kullanır. Sistem tipik olarak aşağıdaki prensiplere göre çalışır:

ORC'den gelen atık ısı, genellikle bir su ve bir soğutucu akışkan karışımı olan bir çözeltiyi ısıtmak için kullanılır. Isıtılmış çözelti, bir soğutucu buharını emdiği ve soğutucunun buharlaşmasına neden olduğu bir soğurucuya girer. Soğutucu akışkan buharı daha sonra bir kompresör kullanılarak daha yüksek bir basınca sıkıştırılır. Daha sonra, sıkıştırılmış soğutucu akışkan, çevreye ısı saldığı ve tekrar sıvı hale dönüştüğü bir yoğunlaştırıcıdan geçer. Son olarak, yoğunlaşmış soğutucu akışkan bir genleşme valfinden geçerek basıncını ve sıcaklığını düşürür ve döngü tekrar eder.

Trijenerasyon sistemi, bu üç sistemi bütünleştirerek, elektrik üretimine ek olarak ORC'den gelen atık ısıyı hem ısıtma hem de soğutma uygulamaları için kullanarak enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarır. Bu bütünleşmiş yaklaşım, enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.

4.1.4 Multijenerasyon sistem



Şekil 4.4 Multijenerasyon sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 4.4'te verilen multijenerasyon enerji sistemi, bir ORC (Organik Rankine çevrimi) tesisi, bir absorpsiyonlu soğutma sistemini, sera ısıtma sistemini, hidrojen üretme santralini ve jeotermal santral bileşenlerini içermektedir. Bu sistem, jeotermal enerji kaynağını kullanarak elektrik, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretmek için tasarlanmıştır.

ORC Türbin ve Jeneratör, jeotermal kaynaktan alınan ısıyı kullanarak elektrik enerjisi üretir. ORC pompa, jeotermal kuyudan alınan sıcak suyu ORC türbine pompalamak için kullanılır. Yoğunlaştırıcı, ORC türbininden çıkan buharı yoğunlaştırarak tekrar sıvı hale getirir.

Buharlaştırıcı, jeotermal kaynaktan alınan sıcak suyu buhara dönüştürür. Soğurucu, ORC türbininden çıkan buharı soğurarak tekrar sıvı hale getirir. Eşanjör-1, ORC türbininden çıkan sıcak suyu jeotermal kuyuya geri döndürmek için kullanılır. Sera ısıtma, ORC tesisi tarafından üretilen ısıyı sera ısıtma sistemine aktarır. Jeneratör 2, ORC tesisinden elde edilen elektrik enerjisini depolar ve dağıtır. Yoğunlaştırıcı, ORC tesisinden çıkan buharı yoğunlaştırarak tekrar sıvı hale getirir. Buharlaştırıcı, jeotermal kaynaktan alınan sıcak suyu buhara dönüştürür. Soğurucu, ORC tesisinden çıkan buharı soğurarak tekrar sıvı hale getirir. Eşanjör-2, ORC tesisinden çıkan sıcak suyu jeotermal kuyuya geri döndürmek için kullanılır.

ORC sisteminin yoğunlaştırıcısı tarafından atılan ısı enerjisi sera ısıtma sisteminde kullanılır. Daha sonra 2 numaralı akışla eşanjör-1'den gelen ısı enerjisi PEM su ısıtıcısına aktarılır. PEM su ısıtıcısı suyu hidrojen ve oksijene ayırmadan önce 80 °C'ye kadar ısıtmaktadır. Daha sonra su, PEM elektrolizöre gönderilir. PEM elektrolizör, suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırır. H₂ kompresör, hidrojen gazını sıkıştırır ve ard arda sıralanmış ısı değiştiricilere (HEX) gönderilir. Bu ısı değiştiriciler sıvı azot kullanarak hidrojen gazını soğutmayı sağlarlar. Hidrojen depolama tankı, hidrojen gazını depolamak için kullanılır.

Bu şekilde, multijenerasyon enerji sistemi, jeotermal enerji kaynağını kullanarak elektrik, ısıtma, soğutma ve hidrojen üretmek için bir dizi bileşeni bir araya getirir. Bu sistem, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji üretimi sağlamayı hedefler.

4.2 Araştırma Bulguları

Bu bölümde çalışmada kullanılan 4 adet enerji üretim sistemi için yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir. Kojenerasyon, tri-jenerasyon ve multijenerasyon sistemin tamamına ve alt ünitelerine uygulanan termodinamik değerlendirmeler ve parametrik çalışmalar sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda önerilen sistemlerin termodinamik verimlerinin yeterli olduğu, Afyon jeotermal kaynaklarından farklı çıktılar alınabileceği görülmüştür. Multijenerasyon üretim için kullanılan entegre enerji üretim sistemleri yüksek performansları, düşük maliyetleri ve düşük emisyonları nedeniyle güç ve diğer faydalı ürünlerin üretilmesinde önemli bir alternatif sunmaktadır. Entegre multijenerasyon sistemlerinin önemini küresel ısınma, iklim değişiklikleri ve ozon tabakasının tahrip olması gibi çevresel sorunların artması, enerjinin giderek daha pahalı olması gibi nedenler artırmaktadır. Bu çalışmada 4 farklı enerji üretim sistemi termodinamik açıdan analiz edilmiş ve sistem performansını etkileyen parametrelerin etkisini ölçmek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalar çevre sıcaklığının, jeotermal kaynağın debisinin ve sıcaklığının gibi sistemler için önemli olan değişkenlerin etkisini göstermiştir.

4.2.1 Afyonkarahisar mevcut ORC Sistemi

Verilen sistem, jeotermal enerjiyi verimli bir şekilde elektriğe dönüştüren organik Rankine çevrimini (ORC) kullanan bir güç üretim sistemini temsil etmektedir. Bu sistem, jeotermal kaynaktan gelen sıcak suyun potansiyelini kullanır. Ana bileşenleri arasında bir jeotermal kuyu, bir pompa, bir buharlaştırıcı, bir türbin, bir jeneratör, bir kondenser ve bir yoğurturucu bulunmaktadır.

Afyonkarahisar mevcut ORC sistemi için enerji ve ekserji verimleri %11,9 ve %30,2 olarak hesaplanmıştır.

4.2.2 Kojenerasyon (elektrik + ısıtma) Enerji Üretim Sistemi

Çizelge 4.1 Kojenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.

Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Spesifik entalpi (kJ/kg)	Spesifik entropi (kJ/kgK)	Kütle akış debisi (kg/s)	Spesifik ekserji (kJ/kg)	Ekserji miktarı (kW)
1	121	240	508.1	1.539	81	53.9	4366
2	79	240	331	1.064	81	18.43	1493
3	54.8	240	229.6	0.7654	81	5.979	484.3
4	39.8	537.5	281.6	0.9929	80.23	38.64	3100
5	13	537.5	69.58	0.2671	80.23	28.44	2282
6	14.2	2503	71.53	0.2684	80.23	30.13	2418
7	71.6	2503	158.5	0.5432	80.23	40.66	3262
8	97	2503	310.4	0.9746	80.23	72.94	5852
9	18	101.3	75.64	0.2678	203.4	0.3493	71.04
10	34	101.3	142.5	0.4915	203.4	0.5566	113.2
11	34.2	120	143.4	0.4942	203.4	0.6001	122.1

Çizelge 4.1 Şekil 4.2’de önerilen kojenerasyon sistemdeki tüm akışların termodinamik özelliklerini içermektedir. Bu verilere dayanarak yapılan hesaplamalar, ORC türbininin toplam 2315 kW elektrik üretme kapasitesi olduğunu göstermektedir. Üretilen elektriğin 330.2 kW’lık kısmı organik Rankine çevriminin pompa gibi elemanlarında kullanıldığından, net elektrik üretim kapasitesi 1985 kW olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin ısıtma üretim kapasitesi 10336 kW olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 Kojenerasyon sistem ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları.

	Enerji verimi	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı (kW)
Jeotermal sistem	0,7498	0,7849	1472 kW
ORC sistemi	0,1627	0,1415	1894 kW
Sera ısıtma	0,7074	0,6368	8748 kW
Kojenerasyon sistem	0,5462	0,4981	12114 kW

Çizelge 4.2 sisteme ait verim hesaplamalarını ve ekserji yıkım oranlarını içermektedir. Analiz sonuçlarına göre, jeotermal sistemin enerji ve ekserji verimleri %75 ve %79 civarındadır. Organik Rankine çevriminin enerji ve ekserji verimleri ise yaklaşık %16 ve %14 olarak hesaplanmıştır. Sistemde en büyük oranda ekserji yıkımı sera ısıtma sisteminde 8748 kW ile gerçekleşmiştir. Kojenerasyon sistemin enerji verimi %54,62 ekserji verimi ise %49,81 olarak hesaplanmıştır.

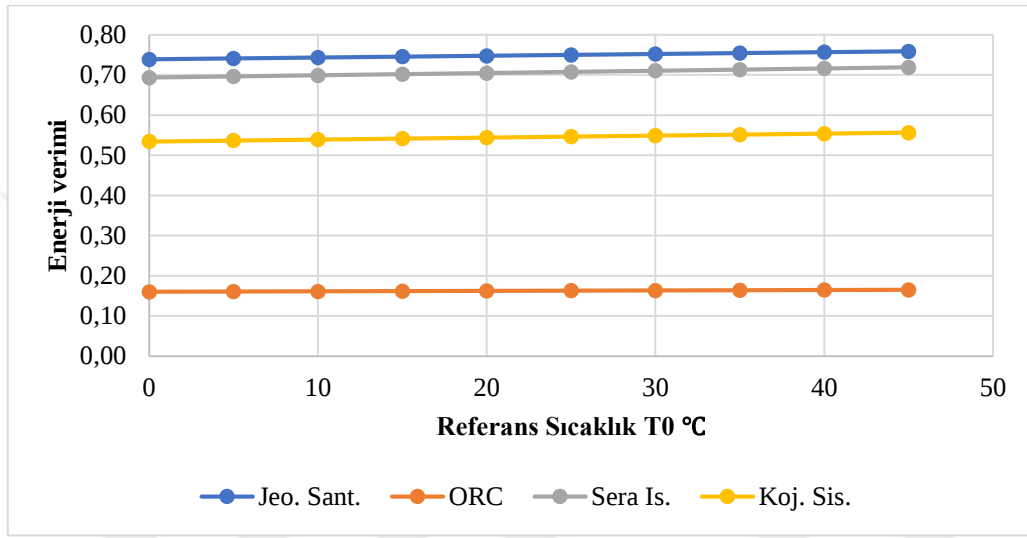
4.2.3 Parametrik Analizler

Bu bölümde kojenerasyon sistemin performansını etkileyen çevre sıcaklığı, jeotermal akışkanın debisi ve jeotermal akışkanın sıcaklığı gibi parametreler incelenmiştir. Bu parametrelerin enerji verimine, ekserji verimine, ekserji yıkım oranlarına ve faydalı ürünlerin üretim miktarına etkileri incelenmiştir.

4.2.3.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi

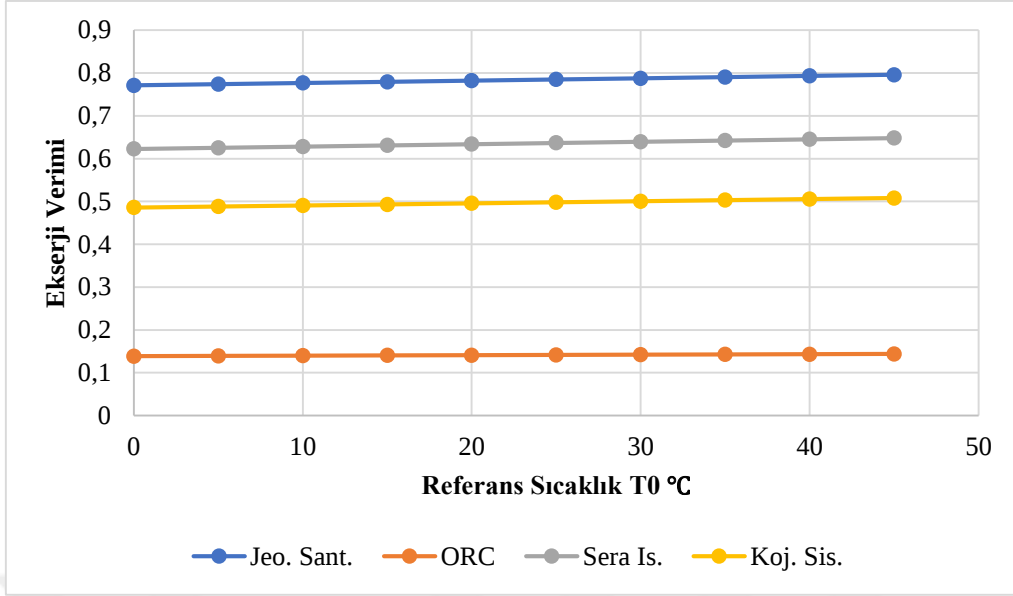
Çoğunlukla ortam sıcaklığı veya çevre sıcaklığı olarak adlandırılan referans ortam sıcaklığı, jeotermal enerji sisteminin performansında ve verimliliğinde önemli bir rol oynar. Bu sıcaklık, jeotermal sistemin çalıştığı dış ortamın temel sıcaklığını temsil eder. Jeotermal enerji santralleri, verimli ısı atımı için jeotermal akışkan ile referans ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından yararlanır. Soğutma işleminin verimliliği bu sıcaklık farkına bağlıdır. Daha yüksek bir referans ortam sıcaklığı, ısı reddinde verimliliğin azalmasına yol açabilir ve potansiyel olarak tesisin genel verimliliğini etkileyebilir. Bir jeotermal enerji santralinin verimliliği genellikle, net iş çıktısını ısı girdisiyle karşılaştıran termal verimliliği kullanılarak ölçülür. Daha yüksek bir referans ortam sıcaklığı, azalan sıcaklık farkı ve daha az etkili ısı atımı nedeniyle termal verimliliği düşürebilir. Jeotermal enerji santralleri aşırı ısıyı dağıtmak için soğutma sistemlerine ihtiyaç duyar. Bu sistemlerin seçimi ve tasarımı referans ortam sıcaklığına bağlıdır. Ortam sıcaklıklarının daha yüksek olduğu bölgelerde, optimum çalışma koşullarını sürdürmek için daha gelişmiş soğutma teknolojileri gerekli olabilir. Termal verimliliğin yanında, enerji ve ekserji verimlerine bakıldığında ise referans ortam sıcaklığının artışı sistemde meydana gelen tersinmezlikleri azalttığından dolayı sistem performansına olumlu etki etmektedir.

Bu bölümde ilk sırada çevre sıcaklığının enerji ve ekserji verimine, ekserji yıkım oranına ve üretim miktarlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5 referans çevre sıcaklığının artışının sistemde bulunan ORC, sera ısıtma sistemi, jeotermal santral ve kojenerasyon sistemin tamamının enerji verimlerini göstermektedir. Referans çevre sıcaklığının 0 °C'den 45 °C'ye artmasıyla birlikte sistemin toplam enerji verimi %53,41'den %55,61'e kadar arttığı hesaplanmıştır.



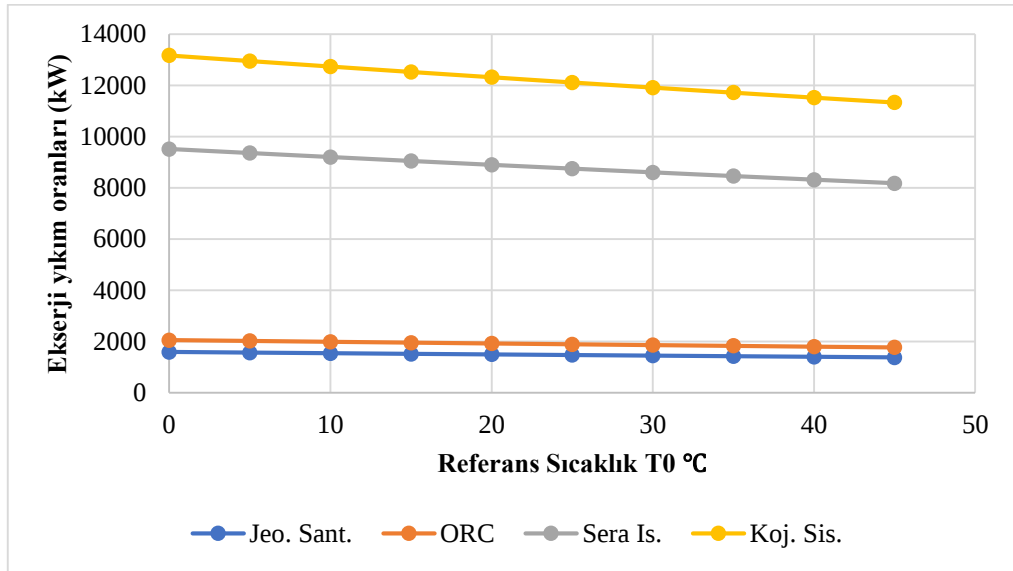
Şekil 4.5 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.

Benzer şekilde 4.6 da referans çevre sıcaklığının ekserji verimine etkisini göstermektedir. Ekserji veriminin tanımından da yola çıkarak referans çevre sıcaklığındaki artış ekserji kayıplarında azalmaya neden olacağı için sistemin verimi artmaktadır. Şekil 4.6 referans çevre sıcaklığının artmasıyla, kojenerasyon sistemin ekserji veriminin %48,58'den %50,81'e kadar arttığını göstermektedir.



Şekil 4.6 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.

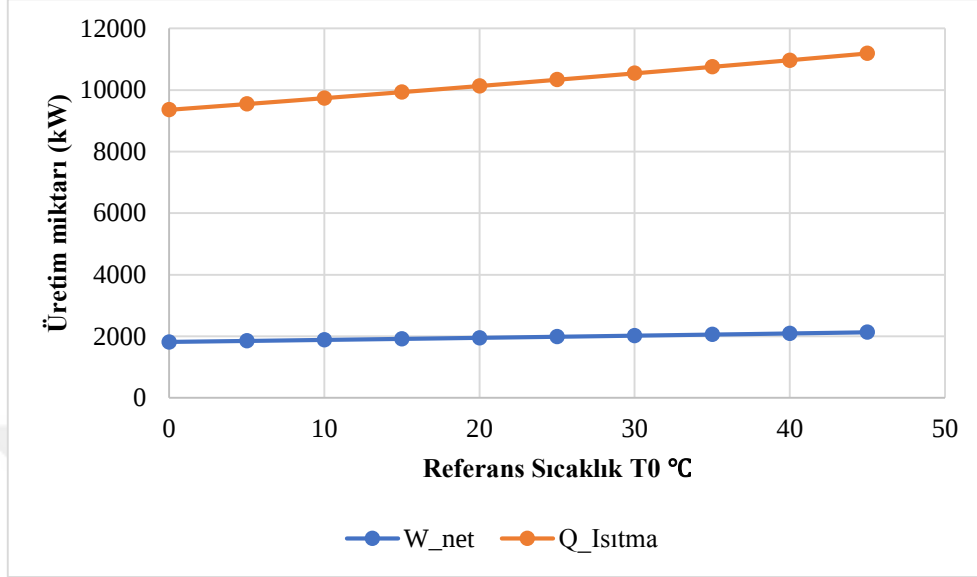
Şekil 4.7 artan referans çevre sıcaklığının sistemde ve alt sistemlerde meydana gelen ekserji yıkım oranlarında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Buna göre kojenerasyon sistemin tamamında oluşan 13166 kW değerindeki ekserji yıkımı, sıcaklık 45 °C'ye çıktığında 11333 kW değerine kadar düşmektedir.



Şekil 4.7 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Şekil 4.8 referans çevre sıcaklığının üretim miktarlarına etkisini göstermektedir. Grafiğe göre, referans çevre sıcaklığı 0°C'den 45 °C'ye çıktığında üretilen net elektrik 1816

kW'dan 2132 kW'a ve üretilen ısı enerjisi miktarı da 9362 kW'dan 11188 kW'a çıkmaktadır.



Şekil 4.8 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.

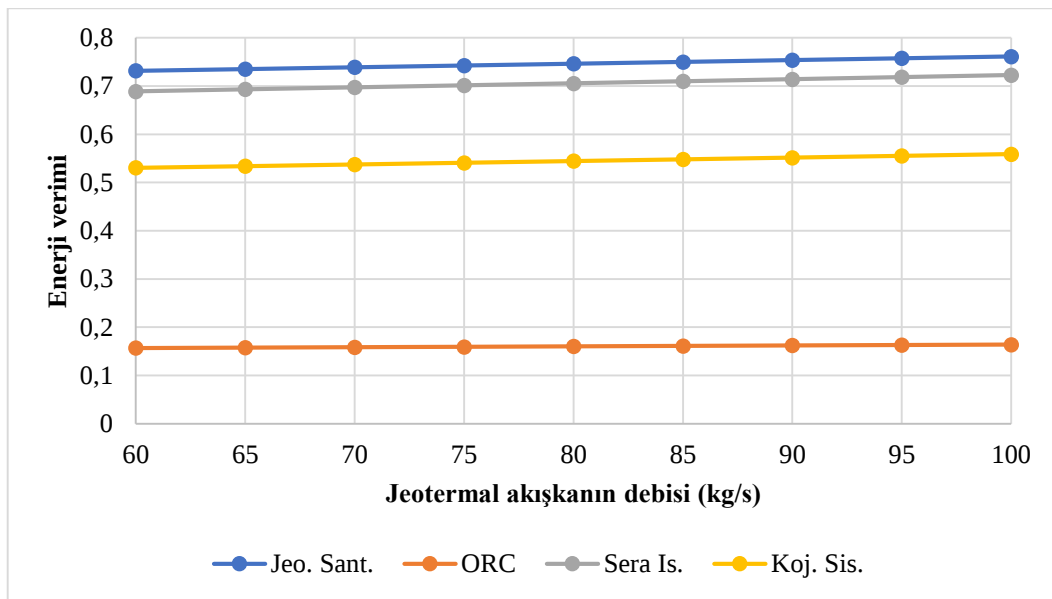
4.2.3.2 Jeotermal Akışkanın Debisinin Etkisi

Jeotermal akışkanın debisi, belirli bir süre içinde bir jeotermal rezervuardan çıkarılan veya buraya enjekte edilen sıvının (genellikle su) miktarıdır. Jeotermal enerji santrali gibi jeotermal enerji kullanan bir enerji sisteminde, jeotermal akışkanın debisi sistemin genel performansı ve verimliliği üzerinde önemli etkileri olabilir. Jeotermal akışkanın debisi, bir jeotermal enerji santralinin güç çıkışını doğrudan etkiler. Daha yüksek bir kütle akış hızı, rezervuardan daha fazla ısının alınabileceği anlamına gelir; bu da türbinleri çalıştırmak için daha fazla buhar üretebilir ve daha fazla elektrik üretebilir. Daha yüksek debiyle, jeotermal rezervuardan enerji santraline daha fazla ısı aktarılır. Bu, daha fazla enerji üretimiyle sonuçlanır ve tesisin şebekeye daha fazla elektrik sağlamasına olanak tanır. Daha yüksek bir debi güç çıkışını artırabilirken, aynı zamanda enerji santralindeki ısı transferi ve dönüşüm süreçleri artan akışa göre optimize edilmezse verimliliğin azalmasına da yol açabilir. Optimum verimliliği sağlamak için kütle akış hızını tesisin tasarımıyla dengelemek çok önemlidir. Uygun yönetim olmadan bir jeotermal rezervuardan yüksek debide çıkarılması, rezervuarın sıcaklığının ve basıncının zamanla azaldığı rezervuarın tükenmesine yol açabilir. Bu, jeotermal

kaynağın uzun vadeli sürdürülebilirliğini azaltabilir ve potansiyel olarak enerji üretim kapasitesini azaltabilir. Jeotermal akışkanın debisi, yeraltı sıvı hareketini, yüzey suyu kütlelerini ve hatta bazı durumlarda sismik aktiviteyi tetikleyerek yerel çevreyi etkileyebilir. Olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için kütle akış hızının yönetilmesi çok önemlidir. Sondaj maliyeti, ekipmanın bakımı ve jeotermal kütle akış hızının yönetilmesi, jeotermal enerji sisteminin ekonomik uygulanabilirliğini etkileyebilir. Akış hızının optimize edilmesi, enerji üretimi ile işletme maliyetleri arasında denge kurulmasına yardımcı olabilir.

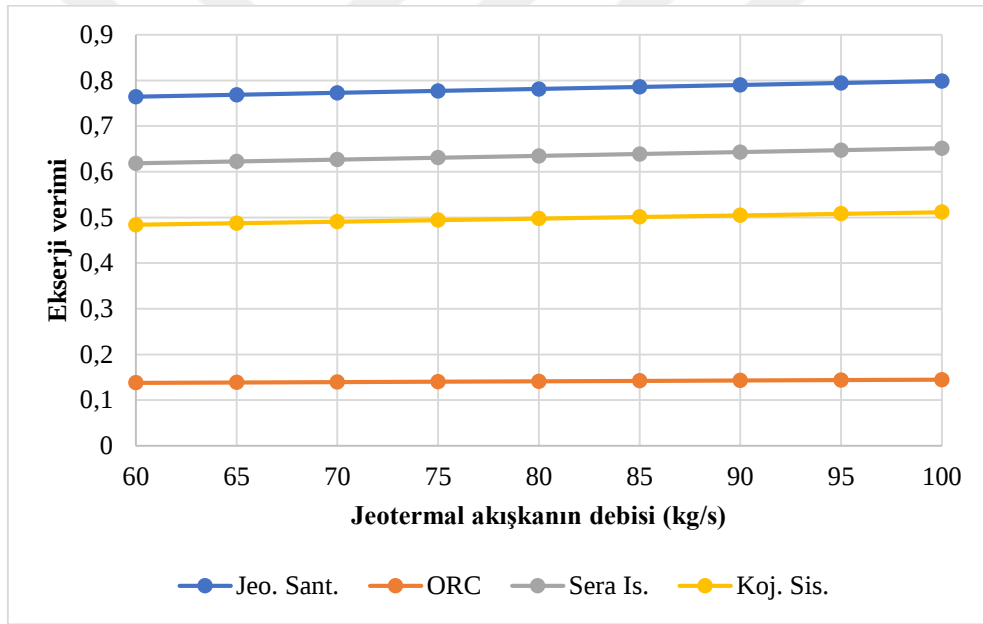
Özetle, jeotermal akışkanın debisi, bir jeotermal enerji sisteminin güç çıkışını, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkiler. Rezervuardan ısının alınması ile uzun vadeli yaşayabilirliğinin korunması arasında doğru dengenin bulunması, jeotermal enerjinin faydalarını maksimuma çıkarırken çevresel ve ekonomik riskleri en aza indirmek için çok önemlidir.

Bu analizde debi 60 kg/s değerinden 100 kg/s değerine değiştirilerek incelenmiştir. Buna göre, Şekil 4.9’da görüldüğü üzere tüm sistemlerin enerji verimleri artan debi ile artmaktadır. Kojenerasyon sistemin enerji verimi %53,04’den %55,86’ya kadar çıkmıştır.



Şekil 4.9 Jeotermal akışkanın debisinin enerji verimlerine etkisi.

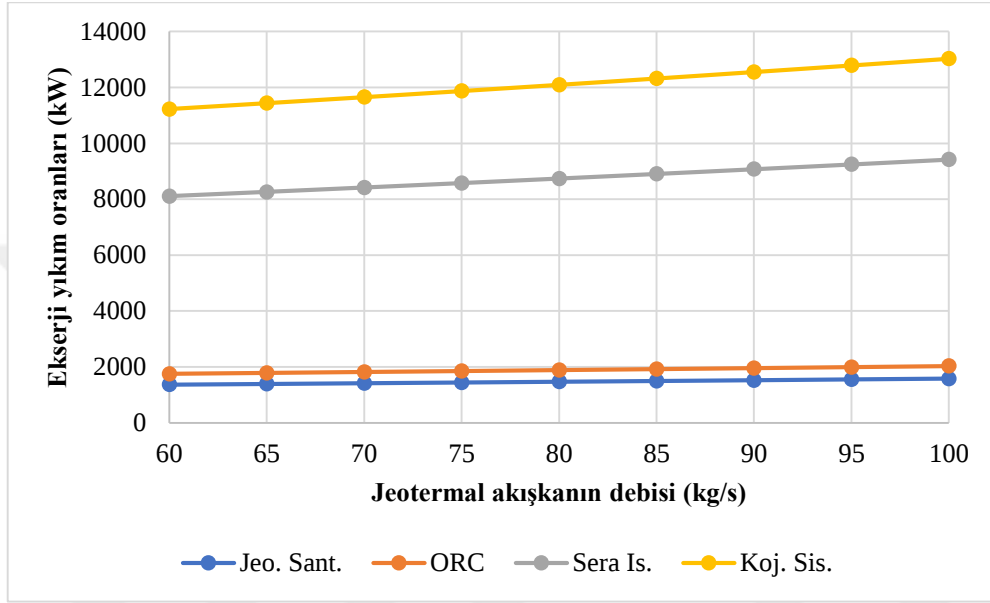
Şekil 4.10 jeotermal akışkanın debisindeki artışın ekserji verimlerini nasıl etkilediğini göstermektedir. Yapılan analizlere göre ekserji verimi artan jeotermal akışkan debisi ile artmaktadır. Jeotermal suyun kütleli debileri 60 kg/s ile 100 kg/s arasında değişmektedir. Her bir tesis için şekil, farklı kütleli akış hızları için ekserji verimliliği değerlerini göstermektedir. Jeotermal suyun kütleli debisinin artmasıyla ekserji verimliliği değerleri artmaktadır. Örneğin, Organik Rankine Çevrimi için, kütle akış hızı 60 kg/s'den 100 kg/s'ye çıktıkça ekserji verimliliği %76,43'ten %79,86'ya yükselir. Benzer şekilde, sera ısıtma tesisi ve kojenerasyon tesisi için jeotermal suyun kütleli debisindeki artışla birlikte ekserji verimliliği değerleri artmaktadır. Şekil, jeotermal suyun kütleli akış hızı ile farklı tesislerin ekserji verimliliği arasındaki ilişkiyi anlamak için yararlı bir referans sağlar.



Şekil 4.10 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji verimlerine etkisi.

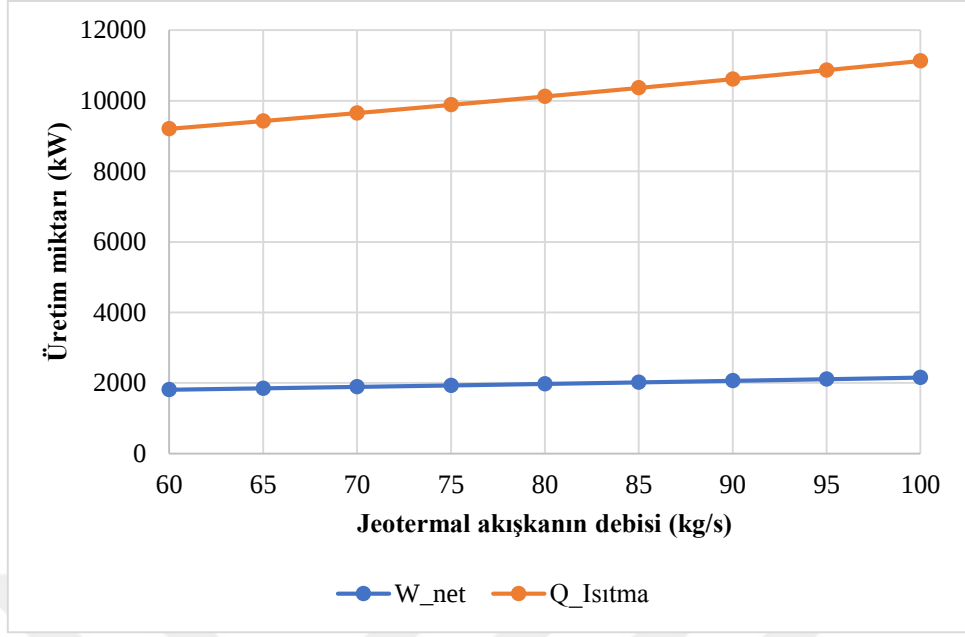
Şekil 4.11 farklı debilerde sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının miktarlarını göstermektedir. Bu bilgi, ekserji yıkımını en aza indirecek ve verimliliği artıracak bir sistemin tasarımını optimize etmek için kullanılabilir. Örneğin, bir jeotermal sistem elektrik üretmek için tasarlanıyorsa, tasarımcı tablodaki bilgileri ekserji yıkımını en aza indirecek ve verimliliği en üst düzeye çıkaracak en uygun kütle akış hızını belirlemek için kullanabilir. Tasarımcı, daha düşük bir ekserji yıkım oranına karşılık gelen bir kütle akış hızı seçerek, atık ısı olarak kaybolan enerji miktarını azaltabilir ve faydalı işe

dönüştürülen enerji miktarını artırabilir. Benzer şekilde, bir kojenerasyon tesisi tasarımcısı, minimum ekserji yıkımı ile aynı anda elektrik ve ısı üretmek için sistemin tasarımını optimize etmek için bu bilgiyi kullanabilir. Şekle göre, jeotermal akışkanın debisi 60 kg/s iken sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkım oranı 11226 kW olarak hesaplanmış, debi 100 kg/s değerine çıktığında 13029 kW değerine yükselmiştir.



Şekil 4.11 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Şekil 4.12 jeotermal akışkanın debisinin değişiminin net elektrik üretim miktarına ve ısıtma gücüne etkisini göstermektedir. Şekle göre, 60 kg/s akış hızında 1811 kW elektrik ve 9208 kW ısıtma sağlanabilirken, 100 kg/s akış hızında 2156 kW elektrik ve 11131 kW ısıtma sağlanabilmektedir.



Şekil 4.12 Jeotermal akışkanın debisinin üretim miktarlarına etkisi.

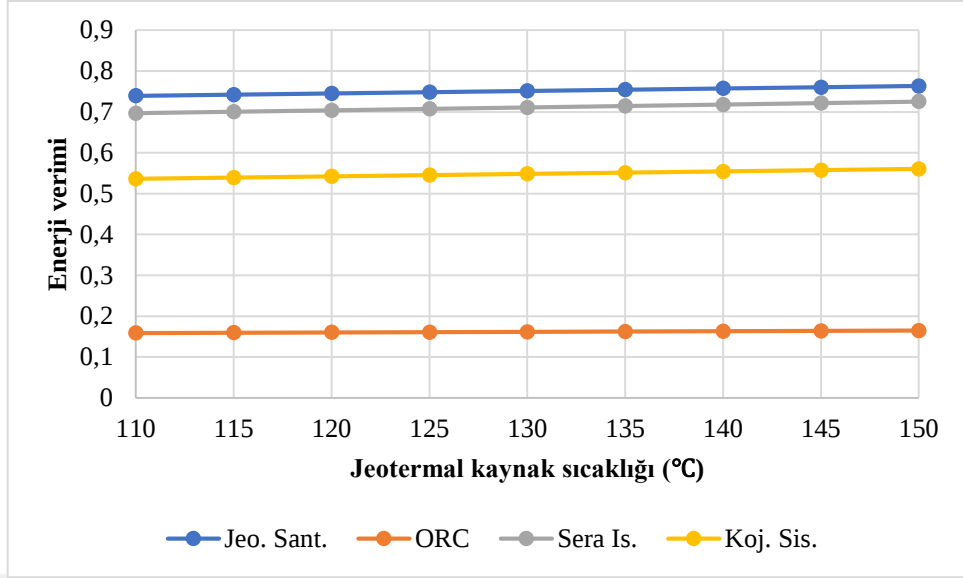
4.2.3.3 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi

Jeotermal suyun sıcaklığı, jeotermal enerji sisteminin performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkileyen çok önemli bir faktördür. Jeotermal kaynağın sıcaklığı, enerji üretimi ve kullanımının çeşitli yönleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Jeotermal suyun sıcaklığı, jeotermal rezervuardan alınabilecek ısı miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek sıcaklıklar, türbinleri çalıştırabilen ve jeotermal enerji santralinde daha fazla elektrik üretebilen buhar üretmek için daha verimli ısı transferine olanak tanır. Daha yüksek bir sıcaklık genellikle daha yüksek güç çıkışına yol açar. Daha yüksek jeotermal su sıcaklıkları, enerji üretim sürecinin daha iyi termodinamik verimliliğine yol açar. Bu, çıkarılan ısının daha fazlasının kullanılabilir elektriğe dönüştürülebileceği ve bunun sonucunda daha verimli bir enerji dönüşüm süreci sağlanabileceği anlamına gelir. Daha yüksek sıcaklığa sahip jeotermal kaynaklar, daha fazla enerji üretimi potansiyeli sundukları için daha değerli kabul edilir. Daha yüksek sıcaklıktaki kaynakların kullanımı, jeotermal enerji projelerinin ekonomik uygulanabilirliğini artırabilir. Jeotermal suyun sıcaklığı, jeotermal enerji santrallerinin konumunu etkileyebilir. Enerji üretimi potansiyelinin artması nedeniyle, daha yüksek sıcaklık kaynaklarına sahip alanların enerji santrali geliştirme için seçilme olasılığı daha

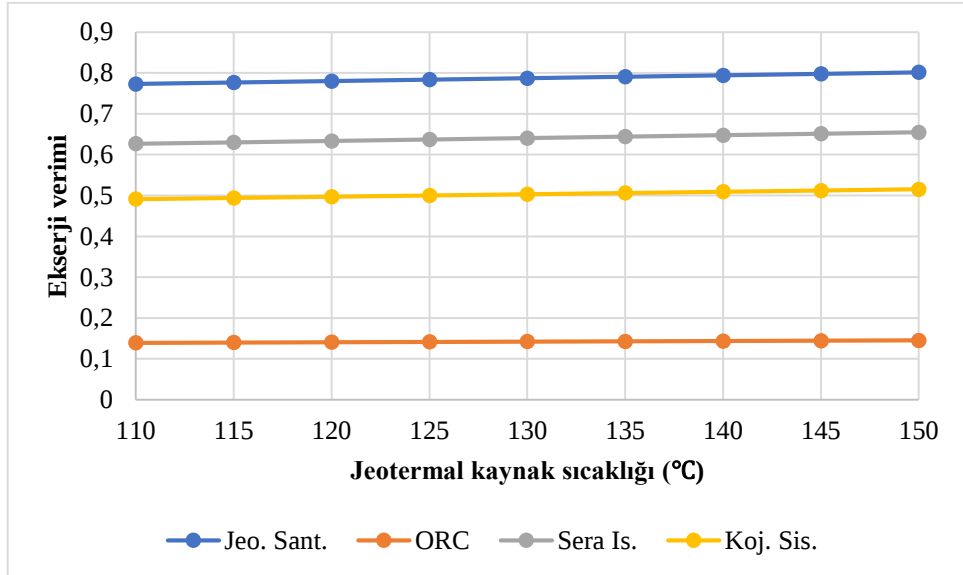
yüksektir. Jeotermal kaynağın sıcaklığı aynı zamanda kullanılabilecek teknolojinin türünü de etkiler. Örneğin ikili çevrimli enerji santralleri düşük sıcaklıktaki kaynaklar için uygundur, flaş buhar ve kuru buharlı enerji santralleri ise daha yüksek sıcaklıktaki kaynaklar için tasarlanmıştır. Aşırı yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynakların miktarı sınırlı olabilir ve dikkatli yönetilmediği takdirde potansiyel olarak rezervuarın daha hızlı tükenmesine yol açabilir. Orta ila düşük sıcaklıktaki kaynakların sürdürülebilir ömrü daha uzun olabilir. Değişken sıcaklıklara sahip jeotermal su, bölgesel ısıtma, sera ısıtması ve endüstriyel prosesler gibi uygulamalar için doğrudan kullanılabilir. Kaynağın sıcaklığı bu uygulamalara uygunluğunu belirler. Jeotermal suyun sıcaklığı, jeotermal enerji sisteminin çevresel etkisini etkileyebilir. Düşük sıcaklıktaki kaynaklar, yüksek sıcaklıktaki kaynaklarla karşılaştırıldığında daha az çevresel kaygıya sahip olabilir ve bu da daha karmaşık sıvı kullanımı ve emisyon hususlarını içerebilir. Özetle, jeotermal suyun sıcaklığı, jeotermal enerji sisteminin teknik, ekonomik ve çevresel yönlerini şekillendiren temel bir faktördür. Daha yüksek sıcaklıklar genellikle güç çıkışının artmasına, verimliliğin artmasına ve daha uygun proje ekonomisine yol açar, ancak bu faydaları, kaynağın uzun vadeli sürdürülebilirliği ve çevresel hususlarla dengelemek önemlidir.

Jeotermal suyun sıcaklığı, kojenerasyon tesisi ve alt sistemlerinin enerji verimliliğinde önemli bir faktördür. Şekil 4.13 kojenerasyon tesisi, organik Rankine çevrim tesisi ve sera ısıtma tesisinin farklı jeotermal su sıcaklıklarında enerji verimliliklerini göstermektedir. Jeotermal suyun sıcaklığı arttıkça bu alt sistemlerin enerji verimlilikleri de artmaktadır.



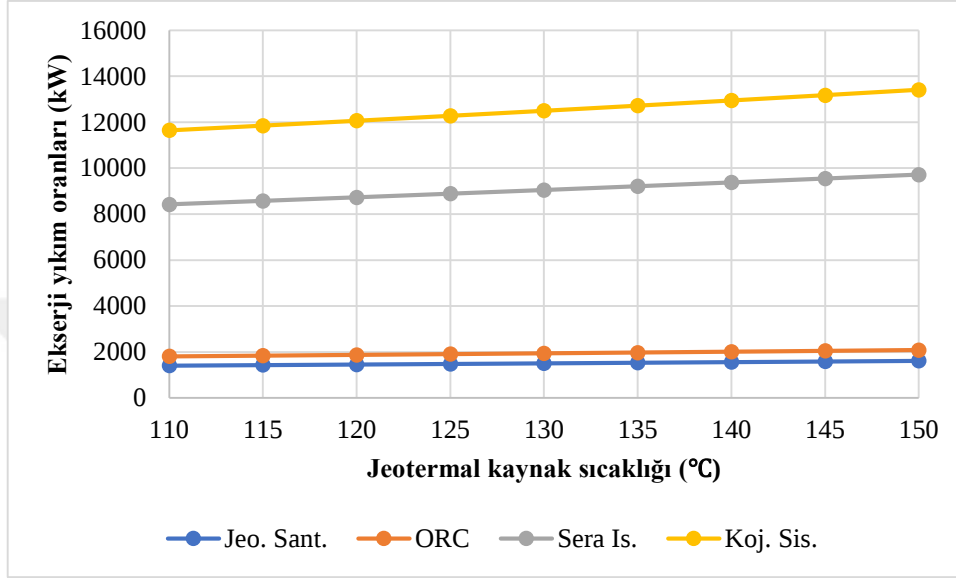
Şekil 4.13 Jeotermal akışkanın sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.

Şekil 4.14 jeotermal suyun sıcaklığı arttıkça kojenerasyon tesisi ve alt sistemlerinin ekserji veriminin de arttığını göstermektedir. Örneğin 110°C sıcaklıkta kojenerasyon tesisinin ekserji verimi %77,32 iken 150°C sıcaklıkta ekserji verimi %80,15'tir. Bu nedenle, jeotermal suyun sıcaklığı ile kojenerasyon santralının ekserji verimliliği arasında pozitif bir ilişki vardır.



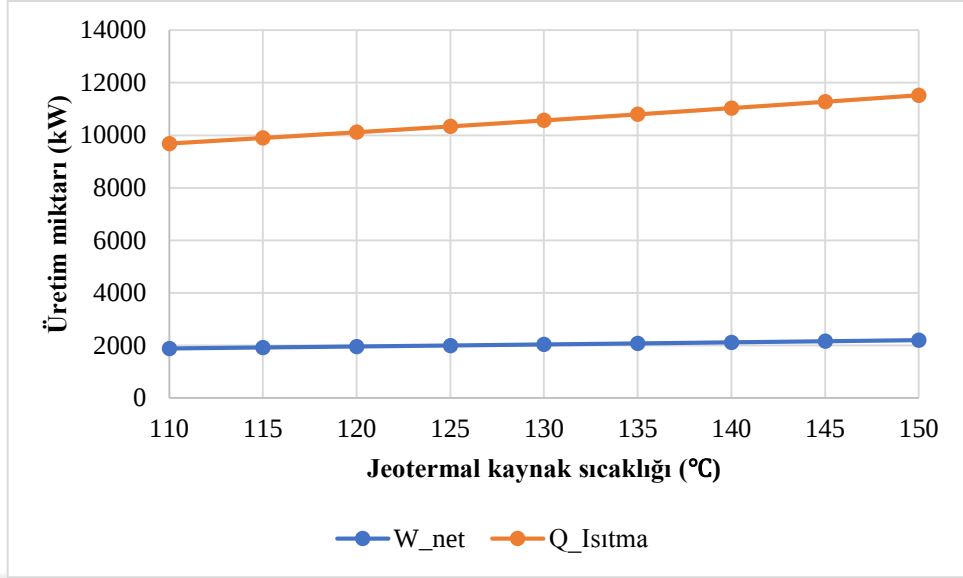
Şekil 4.14 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.

Kojenerasyon sistemin ve alt sistemlerine ait ekserji yıkım oranları Şekil 4.15’de verilmiştir. Oranlar, 110°C -150°C arasında değişen farklı jeotermal su sıcaklıkları için verilmiştir. Kojenerasyon tesisi ve alt sistemleri için ekserji yıkım oranları, jeotermal suyun sıcaklığındaki artışla birlikte artmaktadır.



Şekil 4.15 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Jeotermal kaynak suyunun sıcaklığı 110°C’den 150°C’ye çıktıkça net elektrik üretimi 1875 kW’tan 2197 kW’a, ısıtma değeri de 9682 kW’tan 11524 kW’a çıkmaktadır. Jeotermal su sıcaklığı, kojenerasyon tesisi ve alt sistemlerinin üretim miktarlarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Şekil 4.16 ‘ya göre jeotermal suyun sıcaklığındaki artışla birlikte üretim miktarları da artmaktadır. Bu nedenle, ekserji yıkım oranlarını en aza indirmek ve kojenerasyon tesisi ve alt sistemlerinin verimliliğini artırmak için jeotermal suyun optimum sıcaklığını korumak çok önemlidir.



Şekil 4.16 Jeotermal akışkanın sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.

4.2.4 Tri-jenerasyon (Elektrik + Isıtma + Soğutma) Enerji Üretim Sistemi

Çizelge 4.3 Tri-jenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.

Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Spesifik entalpi (kJ/kg)	Spesifik entropi (kJ/kgK)	Kütle akış debisi (kg/s)	x LiBr%	Spesifik ekserji (kJ/kg)	Ekserji miktarı (kW)
1	121	240	508.1	1.539	81	-	53.9	4366
2	90	240	377.2	1.193	81	-	26.12	2115
3	54.8	240	229.6	0.7654	81	-	5.979	484.3
4	39.8	537.5	281.6	0.9929	37.73	-	38.64	1458
5	13	537.5	69.58	0.2671	37.73	-	28.44	1073
6	14.2	2503	71.53	0.2684	37.73	-	30.13	1137
7	97	2503	310.4	0.9746	37.73	-	72.94	2752
8	18	101.3	75.64	0.2678	95.65	-	0.3493	33.41
9	34	101.3	142.5	0.4915	95.65	-	0.5566	53.24
10	34.2	120	143.4	0.4942	95.65	-	0.6001	57.4
11	85	5.616	2659	8.637	3.26	-	88.58	288.8
12	35	5.616	146.6	0.5051	3.26	-	5.862	19.11
13	6	1.069	139.6	0.5011	3.26	-	5.238	17.08
14	6	1.069	2512	8.999	3.26	-	166.7	543.4
15	35	1.069	88.74	0.2067	29.35	0.5615	29.17	856.1
16	38	5.616	94.7	0.2261	29.35	0.5615	29.37	862
17	63	5.616	145.1	0.382	29.35	0.5615	33.24	975.6
18	85	5.616	220.4	0.4597	26.09	0.631	85.35	2227
19	50	5.616	156.4	0.2714	26.09	0.631	77.51	2022
20	45	1.069	147.4	0.2432	26.09	0.631	76.9	2006

Çizelge 4.3 Şekil 4.3’de önerilen tri-jenerasyon sistemdeki tüm akışların termodinamik özelliklerini içermektedir. Bu verilere dayanarak yapılan hesaplamalar, ORC türbininden 1089 kW elektrik üretim kapasitesinin olduğunu, pompalarda kullanılan miktarlar çıkıldıktan sonra net olarak 758,3 kW güç kapasitesinin olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda sistemin 4860 kW ısıtma ve 7743 kW soğutma kapasitesine sahip olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4 Tri-jenerasyon sistemin ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları.

	<i>Enerji verimi</i>	<i>Ekserji verimi</i>	<i>Ekserji yıkım oranı (kW)</i>
<i>Jeotermal Sistem</i>	0,7713	0,8038	1186 kW
<i>ORC</i>	0,1506	0,1311	987 kW
<i>Sera ısıtma</i>	0,6862	0,5969	3642 kW
<i>Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi</i>	0,1893	0,1618	5413 kW
<i>Tri-jenerasyon santrali</i>	0,5703	0,5094	11228 kW

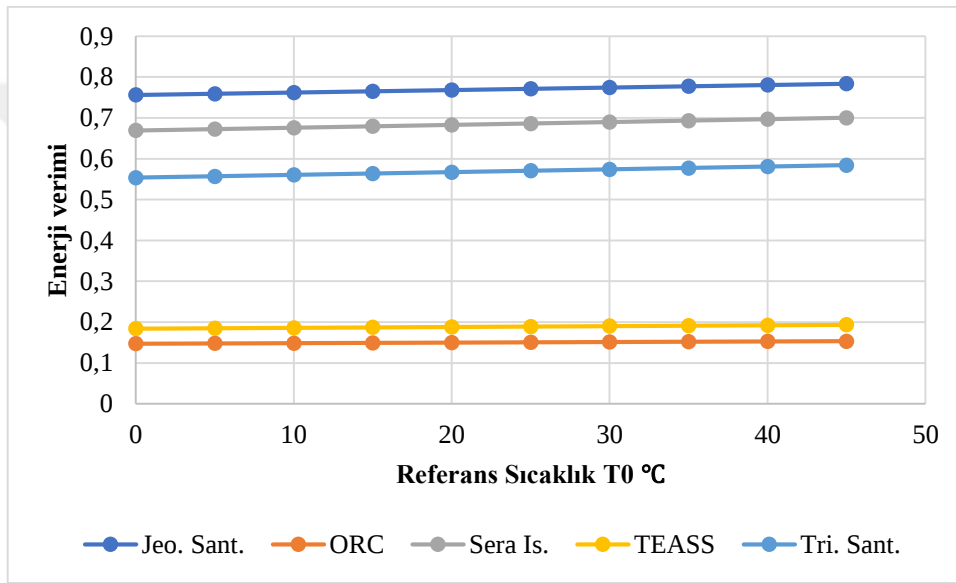
Çizelge 4.4 jeotermal sistemin yüksek bir enerji ve ekserji verimine sahip olduğunu göstermektedir (%77,13 ve %80,38). Ayrıca analizler en yüksek ekserji yıkımının 5413 kW ile soğutma sisteminde daha sonra 3642 kW ile sera ısıtma sisteminde olduğunu göstermektedir. Referans şartlar altında, tri-jenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimi %57,03 ve %50,94 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkım miktarı da 11228 kW’dır.

4.2.5 Parametrik Analizler

Bu bölümde tri-jenerasyon sistemin performansını etkileyen çevre sıcaklığı, jeotermal akışkanın debisi ve jeotermal akışkanın sıcaklığı gibi parametreler incelenmiştir. Bu parametrelerin enerji verimine, ekserji verimine, ekserji yıkım oranlarına ve faydalı ürünlerin üretim miktarına etkileri incelenmiştir.

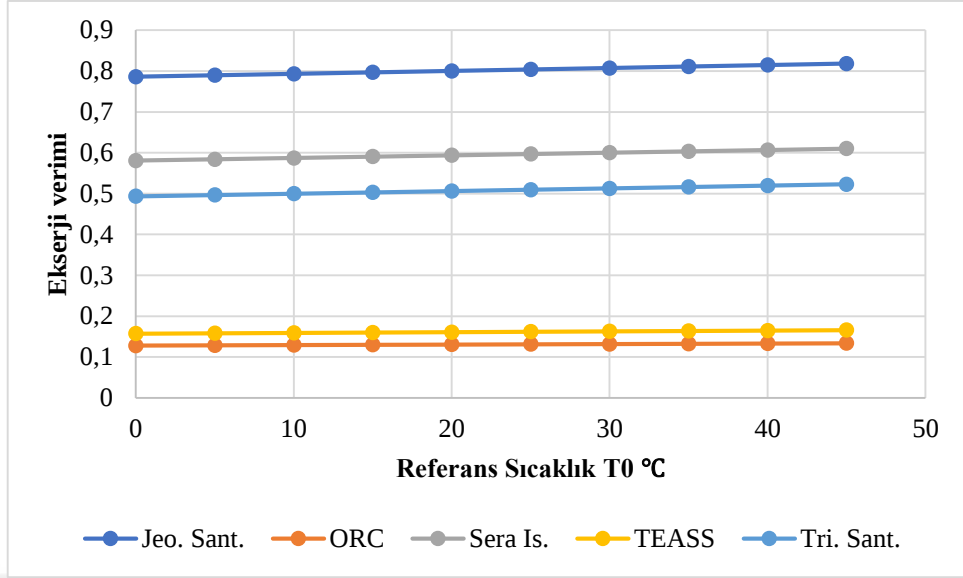
4.2.5.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi

Şekil 4.17 referans sıcaklığın farklı sistemlerin enerji verimliliği üzerindeki etkisi hakkında bilgi sağlar. Sağlanan verilere göre, Jeotermal Sistem, Organik Rankine Çevrim Santrali, Sera ısıtma tesisi, tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi ve Trijenerasyon sisteminin enerji verimliliği, referans sıcaklıktaki artışla artmaktadır. Örneğin, referans sıcaklık 0°C'den 45°C'ye çıktıkça, tri-jenerasyon sistemin enerji verimi %55,35'ten %58,41'e kadar artmaktadır.



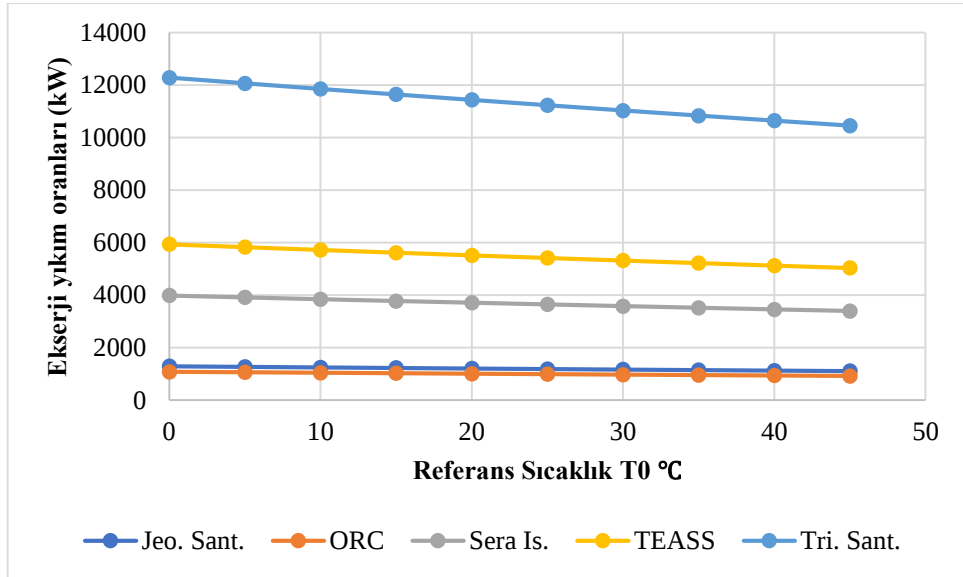
Şekil 4.17 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.

Benzer şekilde, Şekil 4.18 referans sıcaklık artışının ekserji verimlerine etkisini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, referans çevre sıcaklığının artışı sistemlerde meydana gelen tersinmezlikleri azalttığından dolayı ekserji verimlerinde artışa neden olmaktadır. Örneğin jeotermal santralin verimi %78,60'tan %81,84'e ve tri-jenerasyon sistemin ekserji verimi de %49,32'den %52,28'e yükselmektedir.



Şekil 4.18 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.

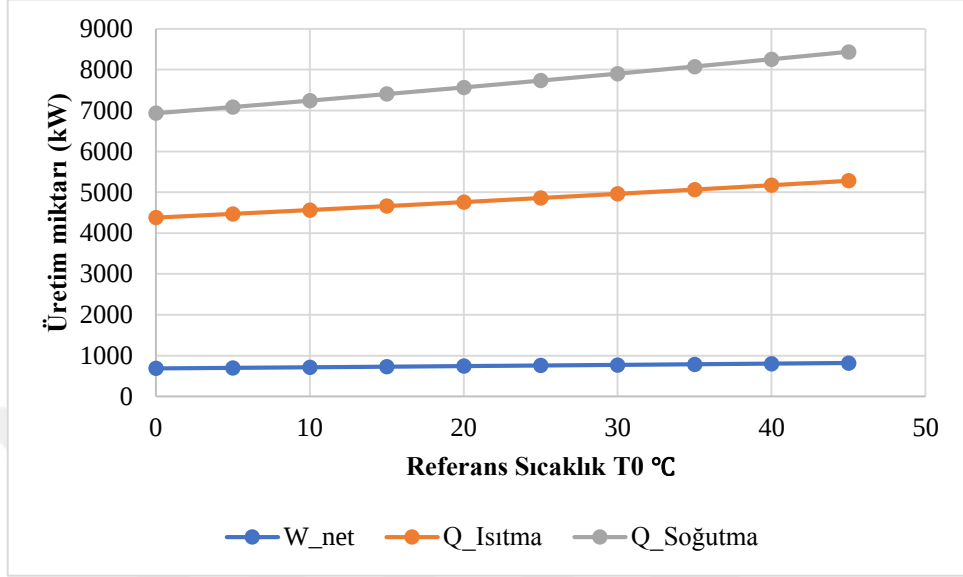
Ekserji verimindeki artış ile birlikte ekserji yıkım oranlarında düşüş gözlenmektedir. Şekil 4.19 ekserji yıkım oranlarının nasıl azaldığını göstermektedir. Tri-jenerasyon sistemin tamamında oluşan 12281 kW değerindeki ekserji yıkımı, sıcaklık 45 °C'ye çıktığında 10451 kW'a düşmektedir.



Şekil 4.19 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

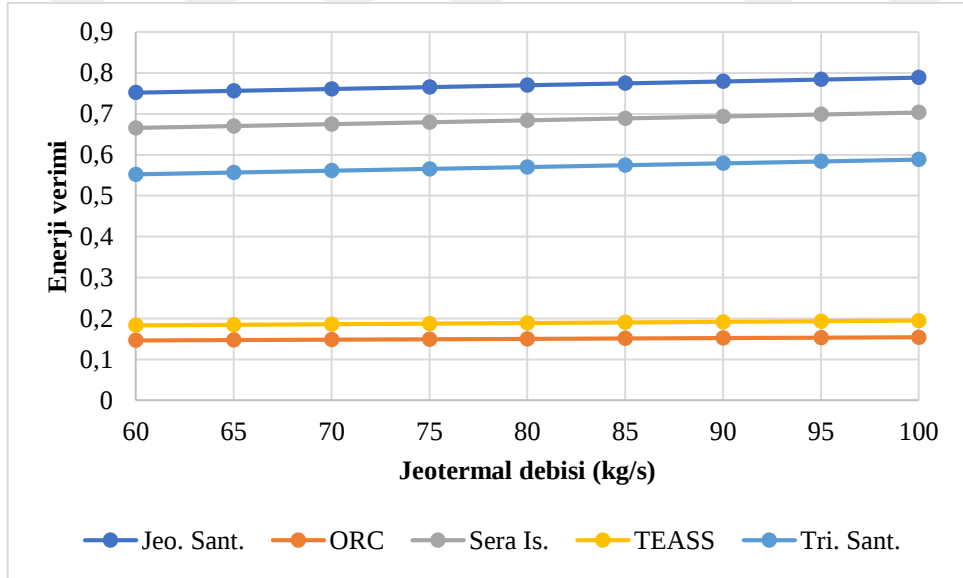
Verimin artması ve ekserji yıkım oranlarının düşmesi üretim miktarlarında da artışa neden olmaktadır. Şekil 4.20'de görüldüğü gibi, sistemin net elektrik üretimi 690

kW'tan 817 kW'a, ısıtma miktarı 4380 kW'tan 5281 kW'a ve soğutma miktarı da 6937 kW'tan 8437 kW'a yükselmiştir.



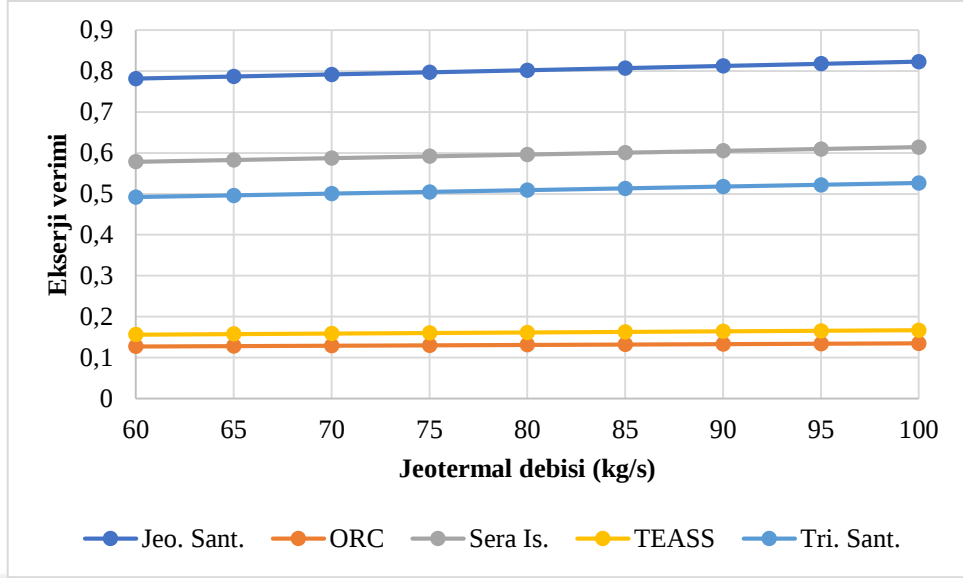
Şekil 4.20 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.

4.2.5.2 Jeotermal Akışkanın Debisinin Etkisi



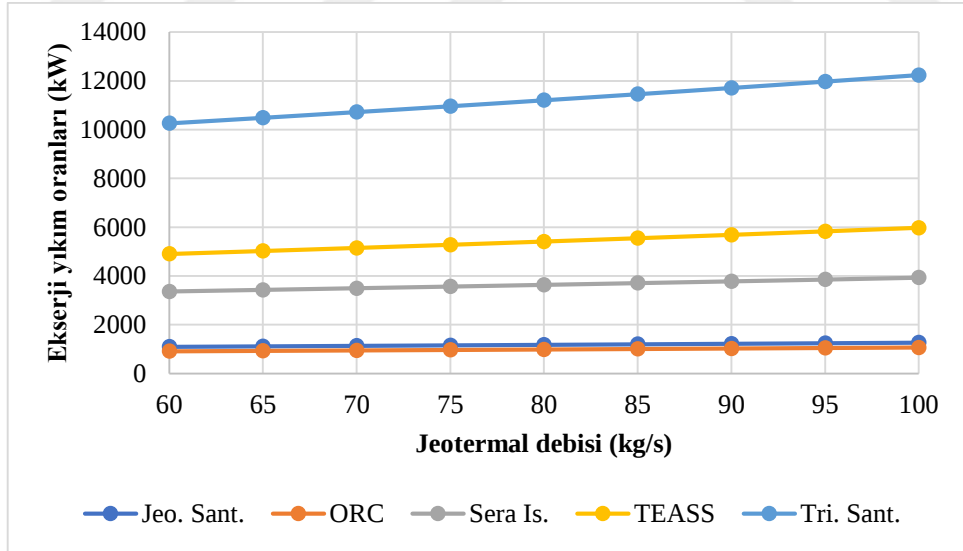
Şekil 4.21 Jeotermal akışkanın debisinin enerji verimlerine etkisi.

Şekil 4.21 debinin enerji verimlerine etkisini göstermektedir. Yapılan analizlere göre, sistemin toplam enerji verimi 60 kg/s'da %55,22 iken 100 kg/s'da %58,86'ya çıkmaktadır. Diğer alt sistemlerin enerji verimleri de artan debi ile birlikte artmaktadır.



Şekil 4.22 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji verimlerine etkisi.

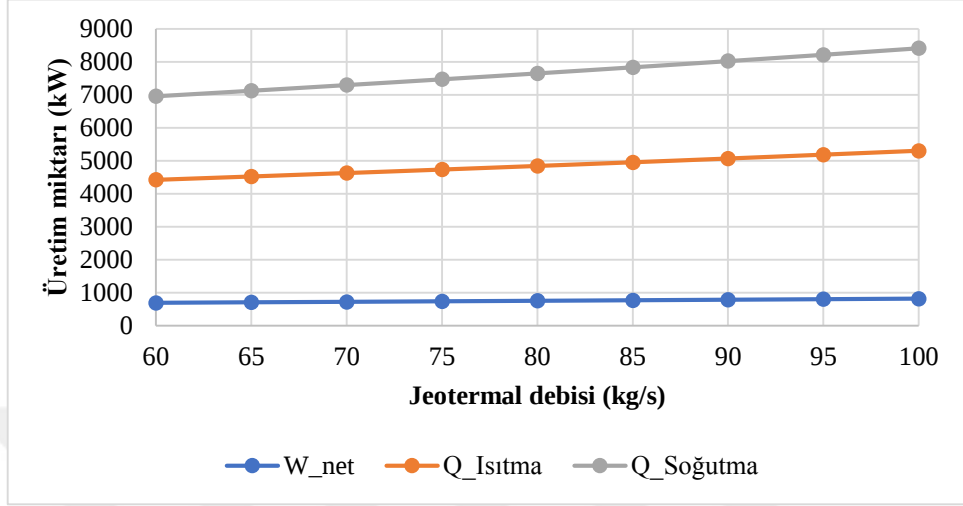
Şekil 4.22 jeotermal akışkanın debisinde meydana gelen artışın ekserji verimlerine etkisini göstermektedir. Şekle göre, debinin artması tüm sistemlerde ekserji veriminin artmasını sağlamaktadır. 100 kg/s’da tri-jenerasyon sistem maksimum %52,63 ekserji verimi sağlamaktadır.



Şekil 4.23 Jeotermal akışkanın debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Yukarıda bahsedildiği üzere jeotermal akışkanın debisinde artış için optimum nokta önemlidir, çünkü verimdeki artışın yanı sıra sistemde meydana gelen ekserji yıkımları

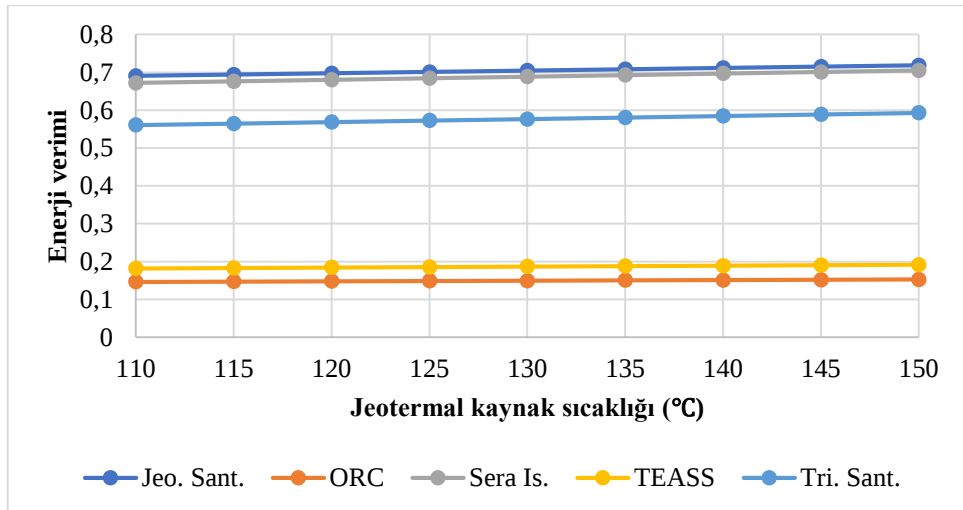
da Şekil 4.23’de görüldüğü üzere artmaktadır. Sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkımı 10257 kW’tan 12233 kW’a kadar yükselmektedir.



Şekil 4.24 Jeotermal akışkanın debisinin üretim miktarlarına etkisi.

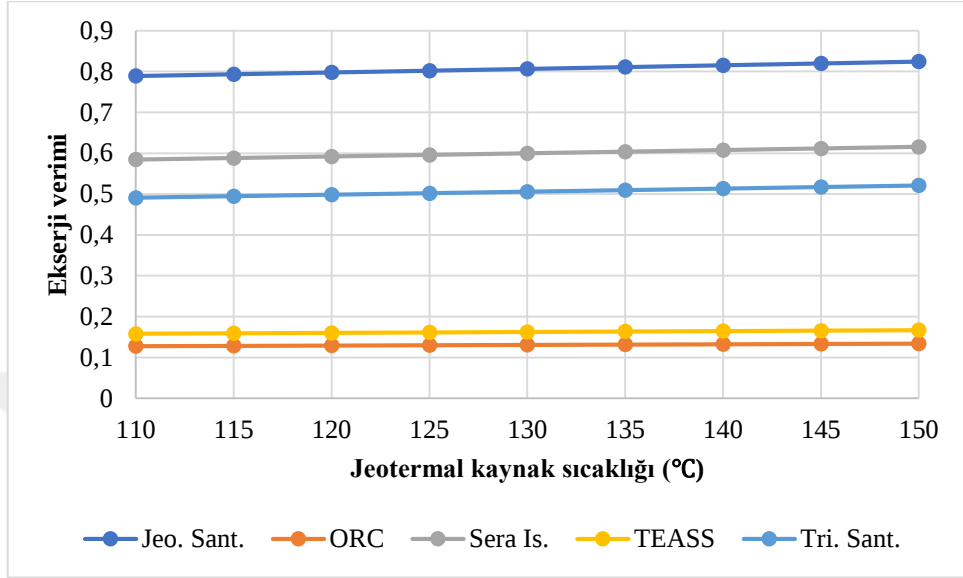
Sistemin enerji ve ekserji veriminde meydana gelen artışlar üretim miktarlarına da yansımaktadır. Şekil 4.24’ten görüldüğü üzere, debinin 60 kg/s’den 100 kg/s’ye çıkması ile birlikte, net elektrik üretimi 691 kW’tan 816 kW’a, ısıtma miktarı 4421 kW’tan 5303 kW’a ve soğutma miktarı da 6959 kW’tan 8413 kW’a artmaktadır.

4.2.5.3 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi



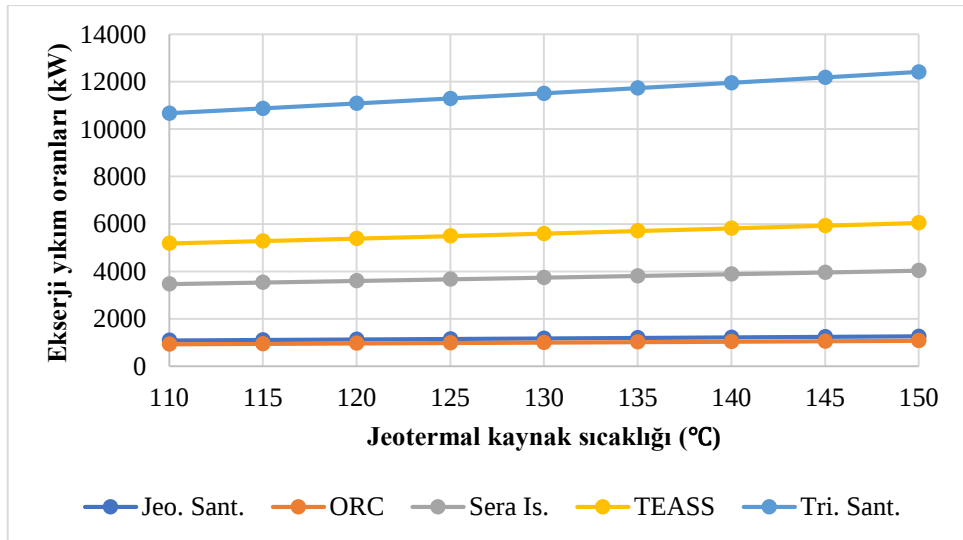
Şekil 4.25 Jeotermal akışkanın sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.

Şekil 4.25 jeotermal kaynak sıcaklığının 110 °C’den 150 °C’ye çıktığında meydana gelen enerji verimlerindeki değişimleri göstermektedir. Kaynak sıcaklığının artması ile tri-jenerasyon sistemin enerji verimi %56,06’dan %59,28’e kadar yükselmektedir.



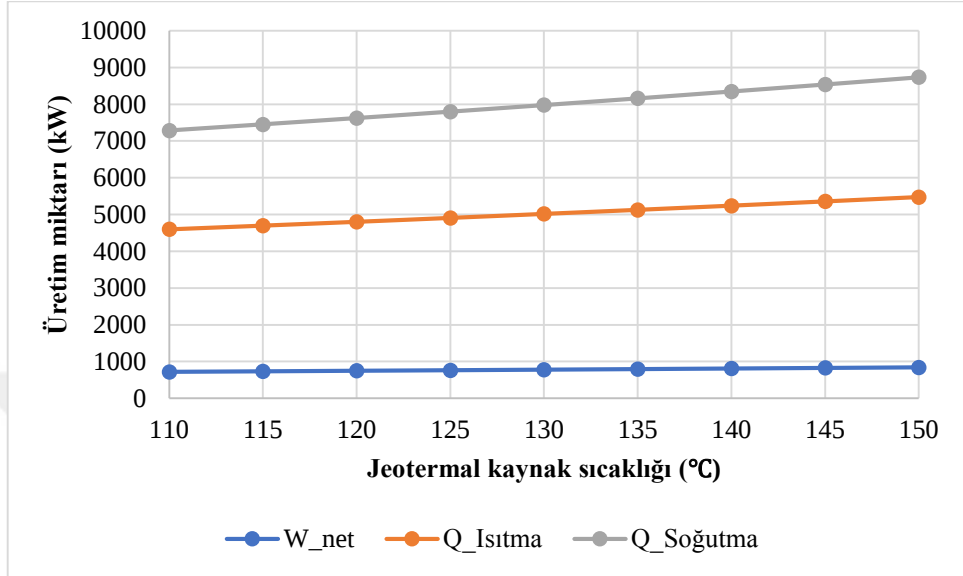
Şekil 4.26 Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.

Şekil 4.26’da ekserji verimlerine meydana gelen değişimleri göstermektedir. Buna göre kaynak sıcaklığı 110 °C’den 150 °C’ye yükseldiğinde, ekserji verimi de %49,09’dan %52,11’e çıkmaktadır.



Şekil 4.27. Jeotermal akışkanın sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Sistemde meydana gelen ekserji yıkımlarının değişimleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Buna göre kaynak suyun sıcaklığı arttıkça ekserji yıkım oranları da artmaktadır. 150 °C’de sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkımı 12414 kW olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28 Jeotermal akışkanın sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.

Üretim miktarlarının etkisini değerlendirdiğimizde Şekil 4.28 kaynak sıcaklığının etkisinin nasıl üretim miktarlarını değiştirdiğini göstermektedir. Buna göre, net elektrik üretimi 719 kW’tan 842 kW’a, ısıtma miktarı 4597 kW’tan 5471 kW’a ve soğutma miktarı da 7282 kW’tan 8735 kW’a kadar artmaktadır.

4.2.6 Multijenerasyon (Elektrik + Isıtma + Soğutma + Hidrojen) Enerji Üretim Sistemi

Çizelge 4.5 tasarlanan multijenerasyon enerji sistemde bulunan tüm akışların termodinamik değerlerini göstermektedir. Bu değerler termodinamik balans denklemlerinde kullanılarak sisteme ait enerji ve ekserji verimleri, ekserji yıkım oranları ve üretim miktarları hesaplanmıştır. Ayrıca parametrelerde değişiklik yaparak sistem performansına etkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.5 Multijenerasyon enerji sistemi için akışların termodinamik değerleri.

Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Spesifik entalpi (kJ/kg)	Spesifik entropi (kJ/kgK)	Kütle akış debisi (kg/s)	x LiBr%	Spesifik ekserji (kJ/kg)	Ekserji miktarı (kW)
1	121	240	508.1	1.539	81	-	53.9	4366
2	90	240	377.2	1.193	81	-	26.12	2115
3	89.98	240	377.1	1.193	81	-	26.1	2114
4	54.8	240	229.6	0.7654	81	-	5.979	484.3
5	39.8	537.5	281.6	0.9929	37.73	-	38.64	1458
6	13	537.5	69.58	0.2671	37.73	-	28.44	1073
7	14.2	2503	71.53	0.2684	37.73	-	30.13	1137
8	97	2503	310.4	0.9746	37.73	-	72.94	2752
9	18	101.3	75.64	0.2678	95.65	-	0.3493	33.41
10	34	101.3	142.5	0.4915	95.65	-	0.5566	53.24
11	34.2	120	143.4	0.4942	95.65	-	0.6001	57.4
12	18	101.3	75.64	0.2678	0.01951	-	0.3493	0.006815
13	80	101.3	335.1	1.076	0.01951	-	18.94	0.3696
14	80	101.3	50.8	0.1564	0.01733	-	7.836	0.1358
15	80	101.3	4723	55.81	0.002184	-	129100	282
16	52.54	101.3	4327	54.64	0.003104	-	128692	399.4
17	52.74	8080	4372	36.54	0.003104	-	129113	400.7
18	-127	8080	1825	25.24	0.003104	-	126793	393.5
19	-195.7	8080	903.3	16.69	0.003104	-	126020	391.1
20	-201.3	8080	820.7	15.58	0.003104	-	125950	390.9
21	-208.2	8080	713.3	14.01	0.003104	-	125879	390.7
22	-227.8	8080	381.3	7.921	0.003104	-	125668	390
23	-252.8	101.3	-0.08484	-0.004531	0.003104	-	125457	389.4
24	-252.8	101.3	-0.08484	-0.004531	0.0009194	-	125457	115.3
25	-216.3	101.3	840.6	33.15	0.0009194	-	125819	115.7
26	-206.9	101.3	939.2	34.76	0.0009194	-	125891	115.7
27	14.85	101.3	3787	52.88	0.0009194	-	128385	118
28	-252.8	101.3	-0.08484	-0.004531	0.002184	-	125500	274.1
29	-208.2	101.3	-147.1	2.481	0.01045	-	841.8	8.796
30	-188.2	101.3	85.59	5.513	0.01045	-	170.6	1.783
31	-208.2	101.3	-147.1	2.481	0.001218	-	841.8	1.025
32	-188.2	101.3	85.59	5.513	0.001218	-	170.6	0.2077
33	85	5.616	2659	8.637	3.258	-	88.58	288.6
34	35	5.616	146.6	0.5051	3.258	-	5.862	19.1
35	6	1.069	139.6	0.5011	3.258	-	5.238	17.07
36	6	1.069	2512	8.999	3.258	-	166.7	543.2
37	35	1.069	88.74	0.2067	29.33	0.5615	29.17	855.7
38	38	5.616	94.7	0.2261	29.33	0.5615	29.37	861.6
39	63	5.616	145.1	0.382	29.33	0.5615	33.24	975.1
40	85	5.616	220.4	0.4597	26.08	0.631	85.35	2226
41	50	5.616	156.4	0.2714	26.08	0.631	77.51	2021
42	45	1.069	147.4	0.2432	26.08	0.631	76.9	2005

Çizelge 4.6 Multijenerasyon sistem ve elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ile ekserji yıkım oranları

	<i>Enerji verimi</i>	<i>Ekserji verimi</i>	<i>Ekserji yıkım oranı (kW)</i>
<i>Jeotermal Sistem</i>	0.7892	0.8217	1042 kW
<i>ORC</i>	0.1371	0.1105	783 kW
<i>Sera ısıtma</i>	0.6614	0.5783	3156 kW
<i>Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi</i>	0.1826	0.1421	4287 kW
<i>Hidrojen üretim santrali</i>	0.7063	0.6614	1264 kW
<i>Multi-jenerasyon santral</i>	0.5914	0.5483	10532 kW

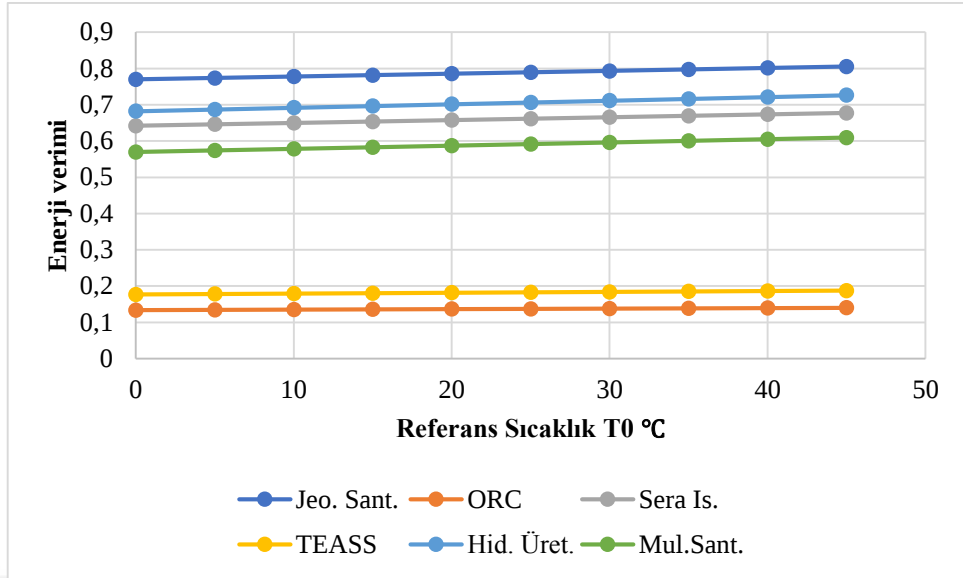
Yapılan analizlere göre, Çizelge 4.6'dan görüldüğü üzere Multijenerasyon sistem %59,14 değerinde bir enerji verimi ile çalışmaktadır. Ayrıca ekserji verimi de %54,83 olarak hesaplanmıştır. Sistemde meydana gelen en yüksek ekserji yıkımları da 4287 kW ile soğutma sisteminde sonrasında 3156 kW ile sera ısıtma sisteminde meydana gelmektedir.

4.2.7 Parametrik Analizler

Bu bölümde multijenerasyon sistemin performansını etkileyen çevre sıcaklığı, jeotermal akışkanın debisi ve jeotermal akışkanın sıcaklığı gibi parametreler incelenmiştir. Bu parametrelerin enerji verimine, ekserji verimine, ekserji yıkım oranlarına ve faydalı ürünlerin üretim miktarına etkileri incelenmiştir.

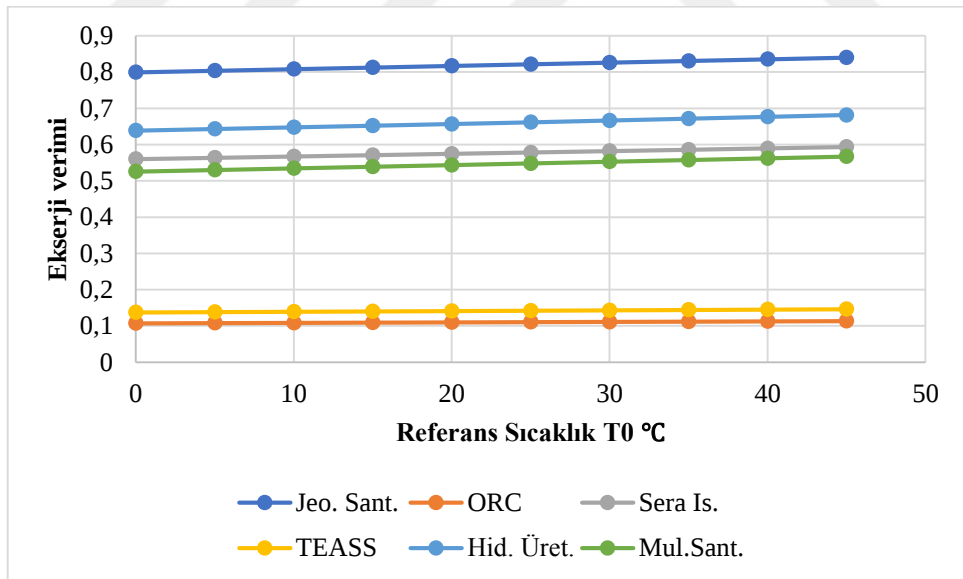
4.2.7.1 Çevre Sıcaklığının Etkisi

Şekil 4.29 çevre sıcaklığının 0 °C ve 45 °C arasında değişiminin, multijenerasyon sistemin ve alt sistemlerinin enerji verimlerine etkisini göstermektedir. Grafiklerden de görüldüğü üzere referans sıcaklık arttıkça sistemin enerji verimlerinde artış gözlenmektedir. Örneğin, multijenerasyon sistemin toplam enerji verimi %56,97'den %60,93'e kadar yükselmektedir.



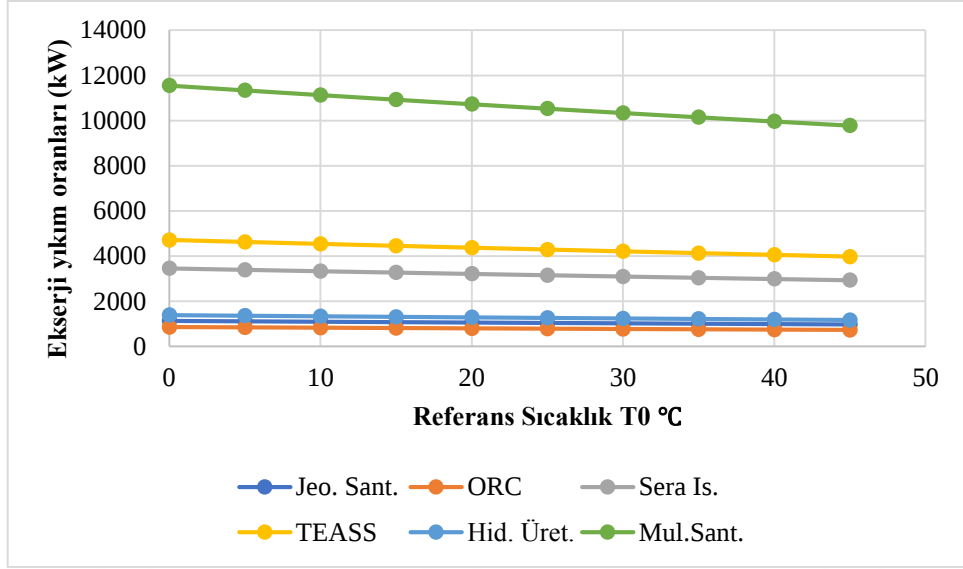
Şekil 4.29 Referans sıcaklık değişiminin enerji verimlerine etkisi.

Ekserji verimleri de enerji verimleri gibi referans sıcaklık artışı ile artmaktadır. Şekil 4.30 artan ekserji verimlerini göstermektedir. Sistemin toplam ekserji verimi ise %52,56'dan %56,72'ye çıkmaktadır.



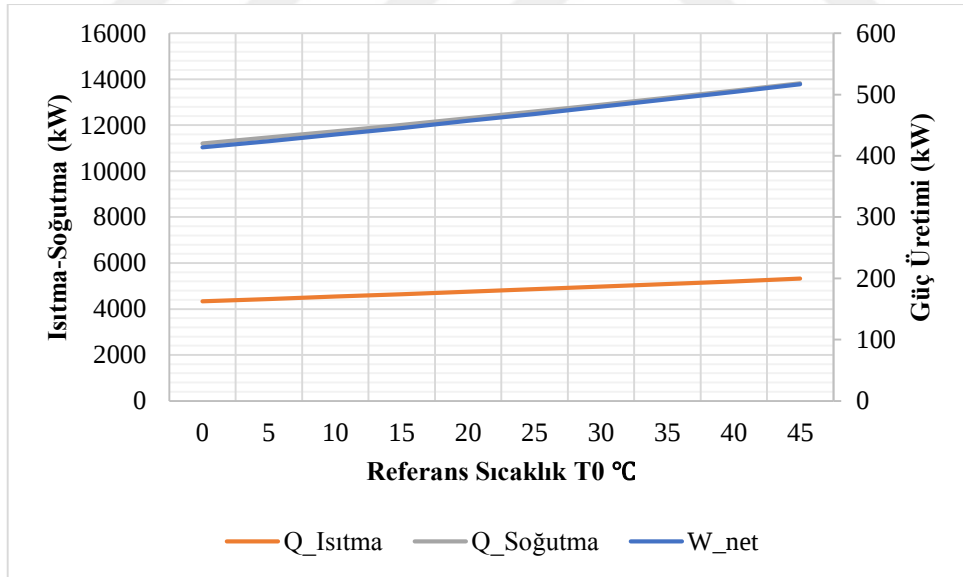
Şekil 4.30 Referans sıcaklık değişiminin ekserji verimlerine etkisi.

Şekil 4.31 sistemde meydana gelen ekserji yıkım oranlarını sunmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere artan referans sıcaklık ile birlikte sistemde meydana gelen ekserji yıkım oranları düşmektedir. Toplam ekserji yıkımı 0 °C'de 11554 kW iken 45 °C'de 9780 kW olarak hesaplanmıştır.



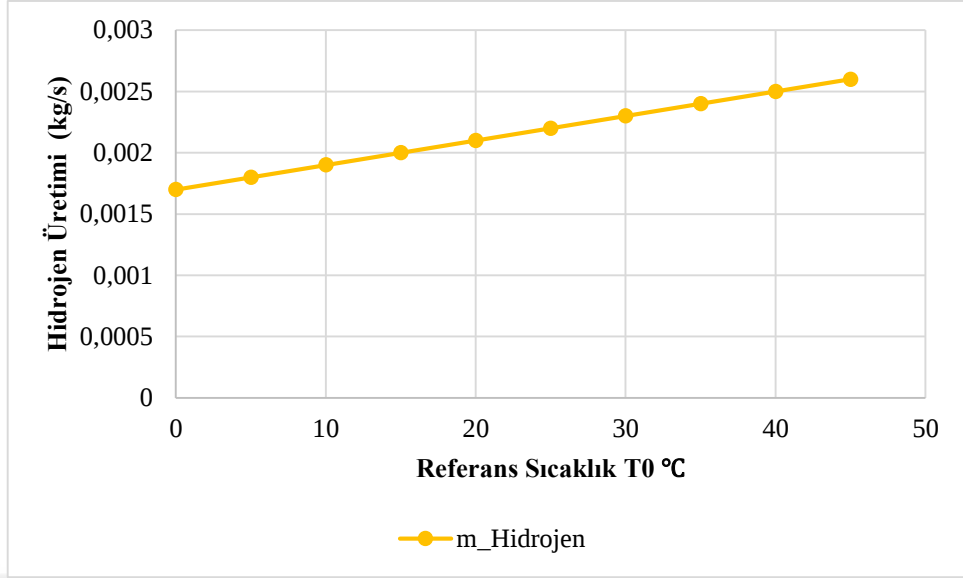
Şekil 4.31 Referans sıcaklık değişiminin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Şekil 4.32 multijenerasyon sistemin hidrojen dışındaki diğer üretim miktarlarının değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, referans sıcaklık artışı üretim miktarlarını olumlu etkilemektedir.



Şekil 4.32 Referans sıcaklık değişiminin üretim miktarlarına etkisi.

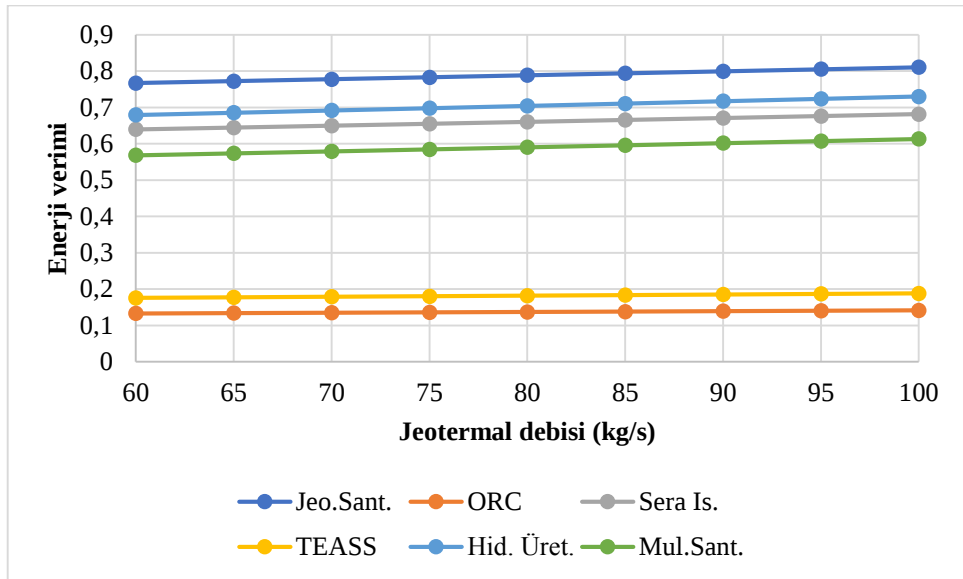
Şekil 4.33 ise değişen sıcaklık ile birlikte hidrojen üretim miktarının nasıl arttığını göstermektedir. 0 °C'de hidrojen üretimi 0,0017 kg/s iken 45 °C'de hidrojen üretimi 0,0026 kg/s değerine çıkmaktadır.



Şekil 4.33 Referans sıcaklık değişiminin hidrojen üretimine etkisi.

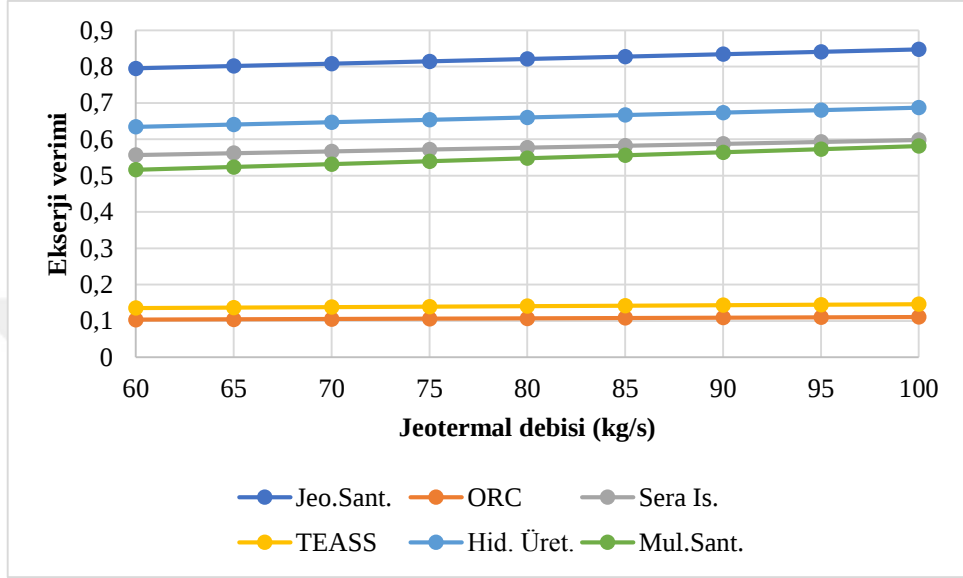
4.2.7.2. Jeotermal Akışkanın Debisinin Etkisi

İkinci parametre ise 60 kg/s'den 100 kg/s'ye artan jeotermal akışkanın debisidir. Şekil 4.34 artan debinin multijenerasyon sistemin ve alt sistemlerin enerji verimini göstermektedir. Buna göre, tüm sistemlerin enerji veriminin arttığı gözlenmektedir. Hesaplamalara göre, multijenerasyon sistemin enerji verimi %56,83'ten %61,29'a çıkmıştır.



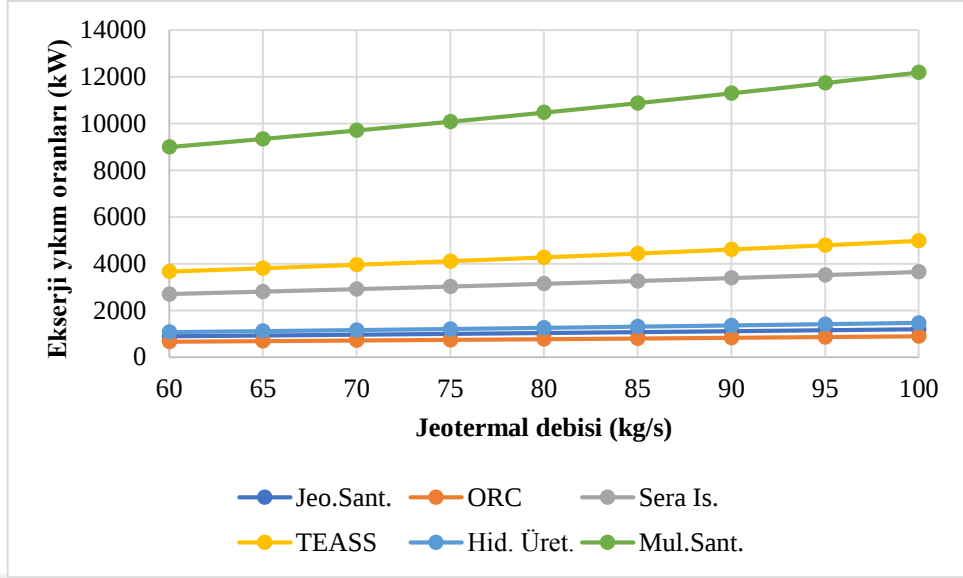
Şekil 4.34 Jeotermal akışkan debisinin enerji verimlerine etkisi.

Şekil 4.35 ise ekserji verimlerindeki artışı göstermektedir. Sistemde en yüksek ekserji verimi jeotermalde santralde bulunmaktadır, bu değer de 60 kg/s’de %79,53 ve 100 kg/s’de %84,77 olarak hesaplanmıştır. Sistemin toplam ekserji verimi ise bu debi aralığında %51,62’den %58,15’e kadar artmaktadır.



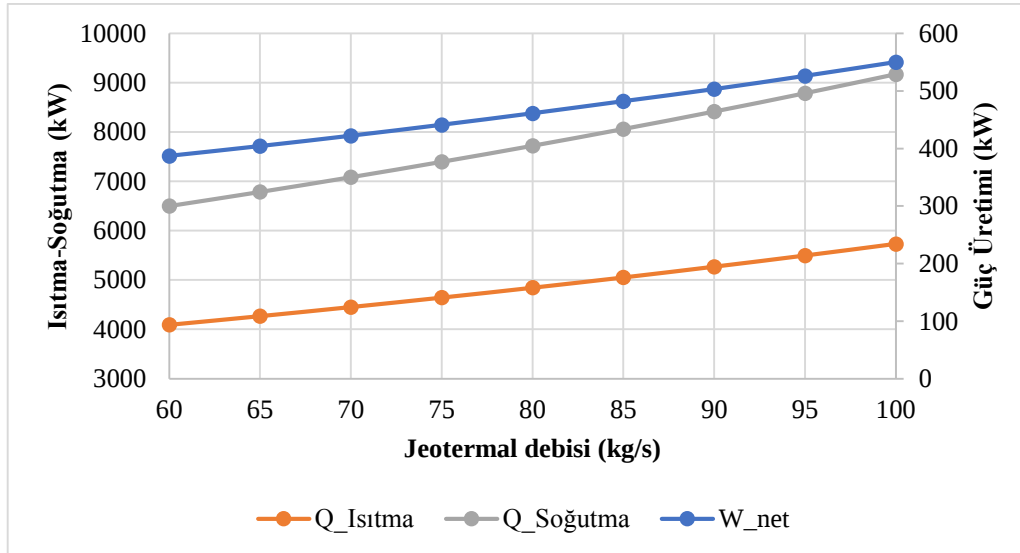
Şekil 4.35 Jeotermal akışkan debisinin ekserji verimlerine etkisi.

Artan jeotermal debisi ile değişen ekserji yıkım oranları da Şekil 4.36’ da verilmiştir. Jeotermal debinin artışı ile sisteme giren enerji miktarını artmasıdır. Bu da sistemlerde meydana gelen iş yükünü artırmaktadır. Jeotermal debinin 60 kg/s’den 100 kg/s’ye artması ile birlikte toplam ekserji yıkımı 9002 kW’tan 12196 kW’a yükselmektedir.

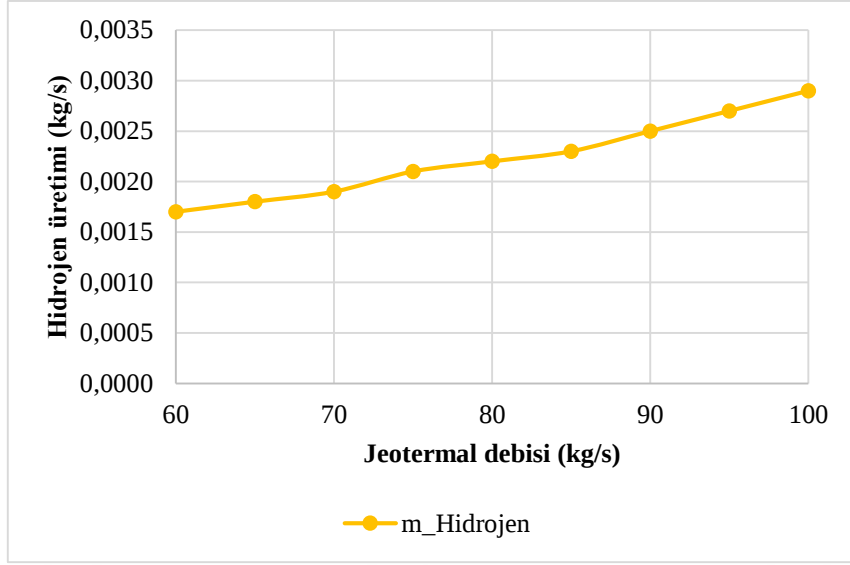


Şekil 4.36 Jeotermal akışkan debisinin ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Isıtma, soğutma ve elektrik üretim miktarlarının değişimi de Şekil 4.37’ de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere debinin artışının üretim miktarlarına olumlu bir etkisi vardır. Net elektrik üretimi 387 kW’tan 550 kW’a, ısıtma miktarı 4093 kW’tan 5732 kW’a ve soğutma miktarı da 6499 kW’tan 9172 kW’a yükselmektedir. Şekil 4.38 ise artan debi ile birlikte değişen hidrojen üretim miktarlarını göstermektedir. Hidrojen üretim miktarı da 0,0017 kg/s’den 0,0029 kg/s’ye kadar yükselmektedir.



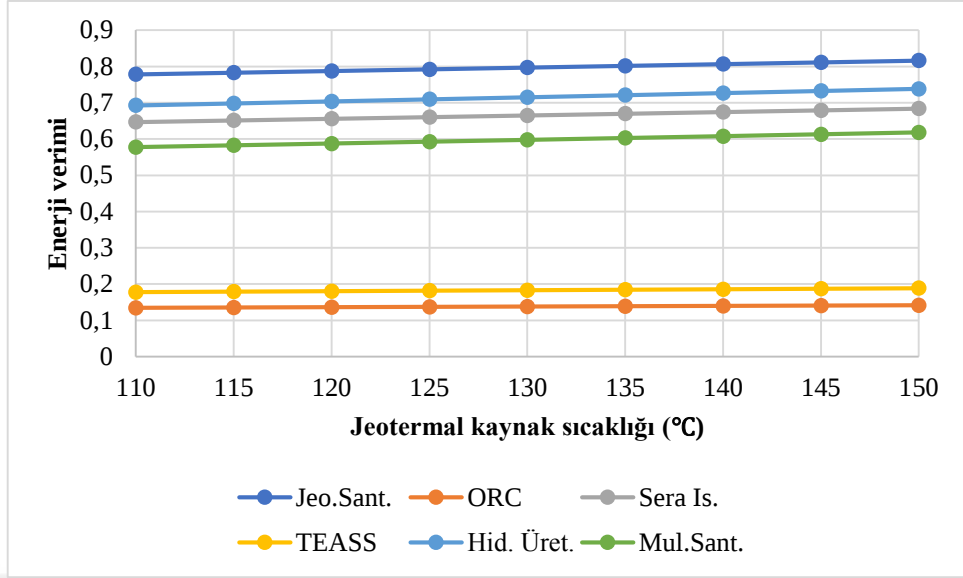
Şekil 4.37 Jeotermal akışkan debisinin üretim miktarlarına etkisi.



Şekil 4.38 Jeotermal akışkan debisinin hidrojen üretimine etkisi.

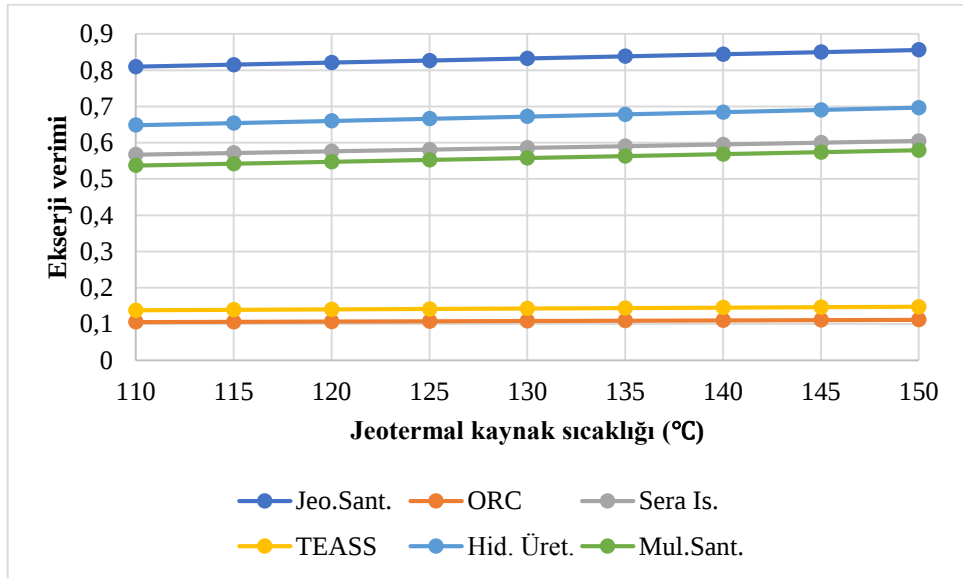
4.2.7.2 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığının Etkisi

Son olarak da jeotermal akışkanın sıcaklığının sistem performansına ve üretim miktarlarına etkisi incelenmiştir. Jeotermal akışkanın sıcaklığı bu çalışmada 110 °C'den 150 °C'ye kadar değiştirilmiştir. Şekil 4.39 artan sıcaklığın multijenerasyon sistem ve alt sistemlerinin enerji verimlerine olan etkisini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, artan sıcaklık organik Rankine çevrimi ve soğutma sistemlerinin performansını çok az bir oranda artırmaktadır. Diğer sistemler ve multijenerasyon sistemin enerji verimleri daha fazla artmaktadır. Sistemin toplam enerji verimi %57,75'ten %61,80'e kadar artmaktadır.



Şekil 4.39 Jeotermal akışkan sıcaklığının enerji verimlerine etkisi.

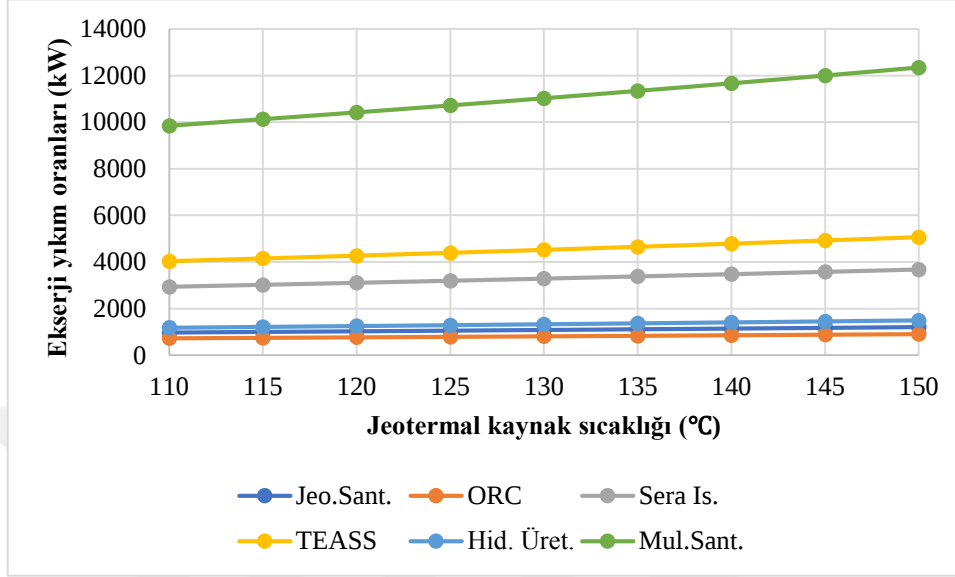
Şekil 4.40 artan akışkan sıcaklığının ekserji verimlerini nasıl etkilediğini göstermektedir. Yapılan hesaplamalara göre en düşük ekserji verimi organik Rankine çevriminde %10,53'ten %11,18'e değişmektedir. Multijenerasyon sistemin ekserji verimi ise %53,70'den %57,92'ye artmaktadır.



Şekil 4.40 Jeotermal akışkan sıcaklığının ekserji verimlerine etkisi.

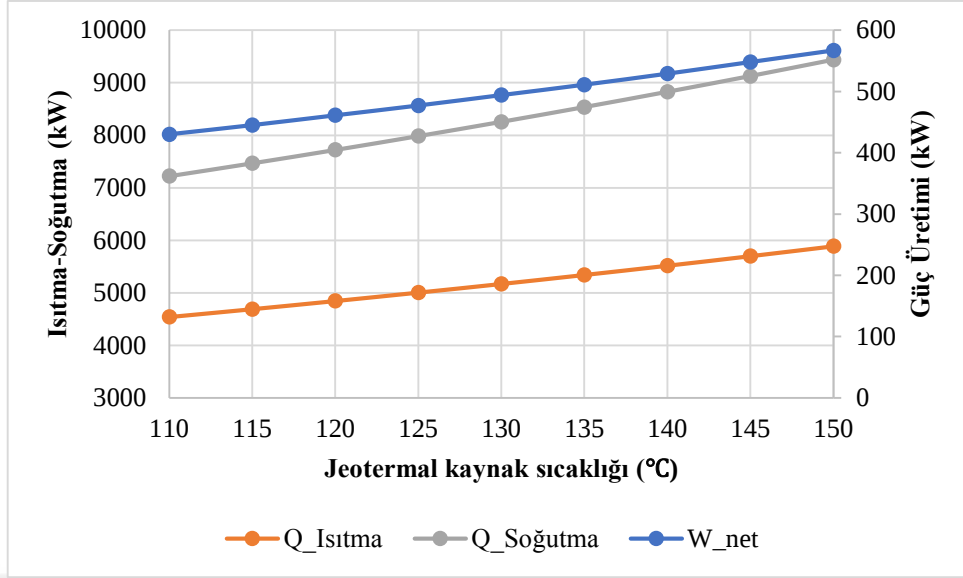
Şekil 4.41 artan jeotermal akışkan sıcaklığının ekserji yıkımlarını nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte sistemde ve alt sistemlerde daha fazla ekserji

yıkımı oluşmaktadır. Buna göre, multijenerasyon sistemin toplam ekserji yıkımı 110 °C’de 9839 kW iken 150 °C’de 12338 kW olarak hesaplanmıştır.

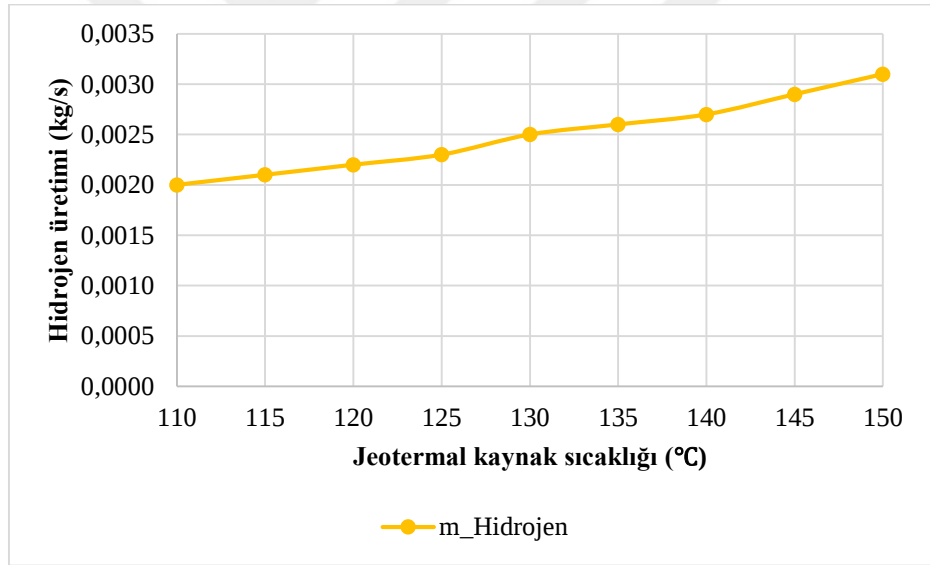


Şekil 4.41 Jeotermal akışkan sıcaklığının ekserji yıkım oranlarına etkisi.

Jeotermal kaynak sıcaklığındaki artış sisteme giren entalpi miktarını artıracığından dolayı verimler artmıştır buna bağlı olarak üretim miktarları da olumlu etkilenmiştir. Şekil 4.42’den görüldüğü üzere, sıcaklık artışı ile birlikte net elektrik üretimi 430 kW’tan 567 kW’a, ısıtma üretimi 4539 kW’tan 5886 kW’a ve soğutma üretimi de 7222 kW’tan 9436 kW’a artmaktadır. Şekil 4.43 ise hidrojen üretim miktarlarındaki değişimi göstermektedir. Buna göre, jeotermal akışkan sıcaklığı 110 °C iken hidrojen üretim miktarı 0,0020 kg/s iken sıcaklık 150 °C olduğunda üretim miktarı 0,0031 kg/s’ye yükselmektedir.



Şekil 4.42 Jeotermal akışkan sıcaklığının üretim miktarlarına etkisi.



Şekil 4.43 Jeotermal akışkan sıcaklığının hidrojen üretimine etkisi.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Jeotermal enerji, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayaç kütlelerinin yağmur, kar, deniz ve magmatik sular ile beslenerek oluşturduğu jeotermal rezervuarlar, atmosferik, yeraltı ve reenjeksiyon koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korurlar. Jeotermal enerji alternatif bir enerji kaynağı olduğundan bu konuda pek çok araştırmacı ve kurum tarafından çok sayıda inceleme ve araştırma yapılmıştır.

Jeotermal enerjiden, farklı değerler ile birçok yararlanma yöntemi bulunmaktadır. Literatür incelemelerine göre bu yöntemler: Elektrik üretimi, merkezi ısıtma ve soğutma, sıcak su ihtiyacının karşılanması, sera ısıtması, hidrojen üretimi, kurutma, ısı pompası uygulamaları v.b. olup, özellikle elektrik üretimi, merkezi ısıtma/sıcak su ve sera ısıtması çalışmalarının fazlalığı dikkat çekmektedir.

Zaim ve Çavşı (2018), yapmış oldukları çalışmada kurulu gücü 2017 Ağustos itibarıyla 861 MWe olan Türkiye’de bulunan jeotermal enerji santrallerinin durumunu incelemiş ve jeotermal enerjinin ülkemizdeki kullanımına yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Çalışmada jeotermal enerji santralleri ile termik santralleri karşılaştırmışlardır ve termik santrallerin kullanılmasının hızlı bir şekilde sonlandırılmasını ve kaynağı tükenmeyen ve çevre dostu olan jeotermal sistemlerin kullanılmasını önermişlerdir.

Akan (2002), yapmış olduğu çalışmada jeotermal sistemlerde faz değişimlerinin ve ısı taşınımının söz konusu olduğunu söylemiştir. Bu doğrultuda karmaşık sistemlerde beslenme-boşalım ilişkisine bağlı olarak meydana gelebilecek değişimlerin tespitinin zor olduğunu savunmuştur. Bu sorunun çözümü olarak sistemin geleceğine yönelik öngörü yapabilmek amacı ile kavramsal modelleme geliştirmiştir. Çalışmada jeotermal sistemin modellenmesine yönelik eşitlikler sunulmuştur.

Aksoy vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada Aydın ve Denizli illerinin yakınlarında bulunan santrallerde kullanılan akışkanların ORÇ modelinin termofiziksel ve termodinamik performans karşılaştırmalarını yapmışlardır. Uygulamada ısı kaynağının

sıcaklığını 110 °C olarak belirlemişlerdir. Buharlaştırma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada performans parametresi olarak ısı verim, türbinin yaptığı iş, ekserji verimi, toplam tersinmezlik ve giren ısı kullanılmıştır. Çalışmada termodinamik analiz hesaplamaları için Engineering Equation Solver (EES) yazılımını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda ısı verim yönünden en yüksek %11,34 ve ekserji verimi %56,90 olarak kuru akışkanlardan n-pentane, toplam tersinmezlik miktarı en düşük 17,99 kJ/kg olarak R134a akışkanında olduğu görülmüştür. ORC'nin termodinamik analizinin yapılması için EES yazılımının başarılı bir şekilde kullanılabildiğini söylemişlerdir.

Tunç vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada jeotermal sahadaki gürültü seviyesini analiz etmek için mikro sismik izleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada mikro sismik izleme ağının nasıl kurulması gerektiğinden bahsetmişlerdir ve kuyudaki gürültü seviyesinin yüzeydeki gürültü sesinden daha az olduğunu söyleyerek mikro sismik olayları net bir şekilde tespit etmek için sismik sensörlerin kullanılmasını önermişlerdir.

Şen ve Yılmaz (2022), yapmış oldukları çalışmada Afyonkarahisar ilindeki konutların elektrik ve ısınma ihtiyacını karşılamak amacı ile jeotermal ve güneş destekli kojenerasyon enerji sisteminin termodinamik modellenmesi ve analizi yapmışlardır. Bahsedilen çalışmada jeotermal ve güneş kaynaklarından elde edilen termal enerji organik rankine çevriminde üretilmiştir. Üretilen elektrik enerjisi şebekeye gönderildikten sonra fazla olan enerji elektroliz ünitesinde hidrojene dönüştürülüp depolanacaktır. Şebekede tekrar enerji ihtiyacı olması durumunda depolanan hidrojen enerjisi yakıt hücresinde tekrardan elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye verilecektir. Çalışmanın termodinamik performans değerlendirmesi EES programında Afyonkarahisar iline ait jeotermal ve güneş enerji değerleri girilerek yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda toplam 2420 kW güç üretimi, bu güç üretiminin doğrudan elektroliz ünitesinde hidrojen üretilmesi için kullanılması durumunda sistemden 0,0154kg/s hidrojen üretildiğini hesaplamışlardır. EES programında termodinamik analiz yapmış ve belli değerlere ulaşmışlardır. Bu analiz ve çalışmaları sonucunda farklı kaynak sıcaklıkları ve güneş ışıınımı değerleri ile parametrik çalışmalar yapmış, yüksek

jeotermal sıcaklık ve güneş ışınlamı ile daha yüksek elektrik ve hidrojen üretilebildiğini görmüşlerdir.

Karahanoğlu (2019), çalışmasında jeotermal enerjinin yüksek basınç ve yüksek entalpi içermesi nedeni ile çok kıymetli yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu savunmuşlardır. Doğal süreçler sonucundaki rezervuar kayaçta depolanan jeotermal akışkanın elektrik üretiminde, konut ısıtmacılığında ve seracılıkta kullanıldığından bahsetmişlerdir. Jeotermal rezervuarların üretiminde doğal dengede bulunan hidrodinamik ve hidrotermal mekanizmaları harekete geçirmektedir. Bunun sonucunda rezervuar içindeki akışkanın hareketi, ısı yayılımı oluşturmaktadır. Bu mekanizmalar matematiksel olarak tanımlanarak modelleme çalışmaları değişik işletim koşullarındaki rezervuarlara uygulanarak jeotermal sistemlerin sürdürülebilir düzeyde üretilmesine olanak sağlanabilmektedir. Bu çalışmada jeotermal rezervuarların sayısal modellenmesinin temel prensipleri anlatılmaktadır ve ilgili denklemlerden bahsedilmiştir.

Takan ve Kandemir (2020), yapmış oldukları çalışmada jeotermal enerjinin ülkemiz için öneminin yüksek olduğundan ve jeotermal enerjinin faydalarından bahsetmişlerdir. Çalışmada Türkiye'nin 2009-2018 yılları arasındaki jeotermal enerjisinin birincil enerji arzını istatistiksel yöntemler ile değerlendirmişlerdir. Analiz yöntemi olarak Mann-Kendall trend analizi ve Şen'in eğitim testi kullanmışlardır. Analiz sonucu olarak nüfus artışı ve teknolojik ilerlemelere bağlı olarak jeotermal enerji birincil enerji arzının gittikçe artacağı düşünüldüğü söylemişlerdir.

Sabah ve Çelik (1999), yapmış oldukları çalışmada jeotermal enerjinin temiz, ucuz, doğal, emniyetli ve yenilenebilir enerji kaynağı olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmada Afyonkarahisar ilinde bulunan Afyon Jeotermal Enerji Sistemi ile 3970 konutun başarılı bir şekilde ısındığını söylemişlerdir. Bu sayıda bir konutun Tunçbilek kömürü ile ısınması durumunda saatte 7 ton yılda ise 30.000 ton kömür harcanacağını savunmuşlardır. Jeotermal enerji yerine kömür kullanılması durumunda her yıl 743 ton SO_x ve 4950 ton partikül maddenin atmosfere karışacağını söyleyerek jeotermal enerji sayesinde partikül madde emisyonunun önlendiğini ve jeotermal enerjinin sadece ucuz

bir alternatif enerji kaynağı olmayıp aynı zamanda çevre dostu bir enerji olduğunu söylemişlerdir.

Yüksel ve Öztürk (2019), yapmış oldukları çalışmada jeotermal enerji kullanarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma üreten bir tesis önerilmiş ve her bir bileşen için kütle enerji, entropi ve ekserji denge denklemlerini türetmişlerdir. Parametreler ile testler yaparak sistemin en önemli çıktılarından olan elektrik ve hidrojenin üretimine bu parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Analiz sonucunda en fazla ekserji yıkımını Kalina çevriminde gerçekleştirdiğini savunmuşlardır. Ayrıca elektrik ve hidrojen üretimini en fazla etkileyen parametrelerin jeotermal kaynağın sıcaklığının ve türbin girişinin basıncı olduğu gözlemlemişlerdir.

Güntürkün ve Güngör (2020), yapmış oldukları çalışmada jeotermal enerji ile ısınan birimlerde her aboneye eşit ve yüksek oranda ısı transferi sağlanması amacıyla oransal vana kontrol sistemi uygulamışlardır. Bunun için iki ayrı oransal vanayı eşanjör dönüşüne bağlamışlardır. Yüzer tip oransal vananın kontrol tipi on-off, analog girişli oransal vananın kontrolü ise PI denetimi ile yapılmıştır. Her iki kontrolde akıllı rölelerin programlanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu iki vananın kontrolünün yapılabilmesi için dokunmatik tuş panel, text panel ve akıllı röle üzerindeki display panel olmak üzere üç ayrı uygulama yapılabilmektedir. Eşanjör giriş, dönüş ve binaya giren sıcaklık değerinin ölçülmesi için PT100 kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda oransal vana kullanılmasıyla kullanılan enerji miktarının 8,27 kWh'tan 3,83 kWh'a düştüğünü gözlemlemişlerdir ve %53,68 oranında enerji tasarrufu sağlandığını söylemişlerdir.

Şahin (2016), yapmış olduğu çalışmada Afyon Jeotermal Elektrik Üretim Tesisi (AFJET) ile Afyonkarahisar bölgesinde ilk kez denemesi yapılacak olan ORC (Organik Rankine Çevrimi) sisteminin tasarımını, verimliliğini ve elektrik üretimini incelemiştir. Sistemin çalışma aralıkları Scada yazılımı ile oluşturulan simülasyona girilmiştir ve bu değişimlerinin sonucuna hesaplama yapılmıştır. Sistemin kurulmasıyla birlikte sistemin kararsız çalışma aralıkları veriminin negatif olduğu bölgelerin belirlenmesinin kolaylaşacağını söylemişlerdir. Kaynak sıcaklık kapasitelerine göre direkt veya dolaylı ısıtma yöntemi ile kurulacak ORC sisteminde elektrik üretim santral yatırımı ile

bölgesel ısıtmaya göre daha avantajlı ve karlı bir yatırımın gerçekleştirilebileceğini belirtmiştir.

Özcan (2021), yapmış olduğu çalışmada ikili tip bir jeotermal güç santralinin termodinamik açıdan analizi ve elde edilen sonuçlara dayalı olarak termoeconomik yönden optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu bağlamda ilk olarak Aydın/Germencik bölgesinde halihazırda faaliyette olan bir jeotermal güç santralinden santralin dizayn noktası ve dizayn dışı çalışma noktalarıyla ilgili veriler toplamıştır. Toplanan verilere dayalı olarak çeşitli simülasyonlar sonucunda santralin bir termodinamik modelini oluşturmuştur ve bu modelin santralin kendi çıktıları ile literatürdeki benzer santralleri çıktıları kullanarak doğrulamıştır. Bu model ile santralin ilk planda ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Sonrasında iş akışkanı seçimini daha efektif hale getirmek için 4 adımdan oluşan termodinamik-termoeconomik kriterlere dayanan bir yöntem önerisi yapmıştır. Akışkan önerisi olarak 29 adet akışkan içerisinde R113'ün mevcut n-pentan akışkanına göre daha uygun olabileceğini değerlendirirken santral çıkışında jeotermal atık suyun yeniden kullanımı için geri dönüşüm önerilerek R115 akışkanını tavsiye etmiştir. Bu çalışma sonucunda üç farklı eksergoeconomik analiz yöntemi kullanılmak suretiyle ilk termodinamik model vasıtasıyla santralin birim elektrik üretim maliyeti tahmin edilmeye çalışılmış ve yöntemlerin birbirine göre karşılaştırılması yapılmıştır. İlk planda iki döngüde yer alan türbin eğrilerinin tespitiyle dizayn dışı data kullanılarak termodinamik modele entegrasyonu sağlanmıştır. Türbin eğrilerinin güç ve akışkan debisi tahmin hassasiyetlerini artırmak amacıyla MATLAB ortamında çeşitli parametreler için istatistiksel modeller de kurulmuştur. Türbin eğrilerinden elde edilen sonuçlar çeşitli santral verileri ve ampirik korelasyonlarla kıyaslanmıştır.

Cimşit (2019), yapmış olduğu çalışmada ORC sistemlerinde akışkan yapı olarak çevreye dost olan soğutucu yapıda akışkanlar kullanıldığını söylemiştir. Çalışmada ORC için ısı kaynağı olarak Türkiye için zengin potansiyel yapıda önemli jeotermal enerji düşünülmüştür ve çevrimin teorik termodinamik analizini yapmışlardır. ORC çevriminde R-124 akışkanının kullanıldığının kabul ederek kazan ve yoğunlaştırıcı sıcaklıklarının çevrim performansına etkisini incelemiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda kazan sıcaklığının arttıkça güç çevriminin termal veriminin de arttığını gözlemlemiştir.

Buna göre yoğuşturucu sıcaklığındaki artış güç çevriminin termal verim de azalmaya sebep olmaktadır. Çalışmada ayrıca Organik Rankine Çevrimine farklı organik akışkanlar için uygun akışkan belirlemede analiz yapılmıştır. Organik akışkan olarak R-134'a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600'a ve R-290 seçilerek elde edilen Organik Rankine Çevrimlerinin çevresel, performans ve güvenlik etkileri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Yoğuşturucu sıcaklığındaki artışla beraber güç çevrimi termal verimi de azalmaktadır. Ayrıca çalışmada Organik Rankine Çevrimine uygun akışkan belirlemek adı altında farklı organik akışkanlar için analiz yapılmıştır. Engineering Equation Solver (EES) programında hesaplama yapılmıştır. Karşılaştırmaların sonucunda ise akışkanlar arasından en yüksek güç çevrimi termal verim değeri R-123 akışkanında bulunurken, en düşük ise R-125 akışkanında bulunmuştur. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde en uygun kullanılabilcek akışkanların R-600, R-600'a ve R-290'a ait olduğu akışkanlarının oldukları görülmüştür.

Yalçinkaya (2012), çalışmasında jeotermal enerji kaynaklı üç farklı güç çevrimi tasarlamış ve bunların termodinamik analizlerini yapmıştır. Çalıştığı üç çevrimde entropi üretiminin pozitif değerde olmasıyla çevrimlerin uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Kervankıran (2012), çalışmasında Afyonkarahisar ilinin jeotermal saha ve kullanım alanlarını araştırmış bunun sonucunda; jeotermal enerjinin çıkarılması, kullanımı ve sonrasında çevreye reenjeksiyon yapılmaması veya arıtılmadan doğaya bırakılmasından kaynaklı problemler olduğunu belirtmiştir.

Akbay ve Yılmaz (2020), jeotermal enerji destekli flaş ikili güç üretim çevriminin termodinamik performans analizini incelemiş, farklı akışkanlara göre enerji ve ekserji verimliliklerini karşılatırmıştır. Çalışmanın amacı termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarına göre jeotermal enerji ile güç üretimini araştırmaktır. Sonuç olarak da jeotermalin çıkış basıncı ve sıcaklığının artmasıyla önerdikleri sistemde güç üretiminin arttığını gözlemlemişlerdir.

Yukarıda belirtilen çalışmalarda çevresel faktörlerin sistem üzerindeki etkileri, ORC sistemi ile termodinamik analizler gerçekleştirilmiş ve enerji üretim sistemleri üzerinde çalışmalar incelenmiş, yeterlilik yahut daha verimli sonuç ve sistemler için önerilerde bulunmuştur. Ayrıca alternatif enerji kaynağı olarak jeotermal enerji kullanımının; çevre dostu, temiz ve sürdürülebilir olduğundan artması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada;

Öncelikle Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasalarına göre kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri tanıtılmıştır. Çalışmada kullanılan 4 adet enerji üretim sistemi için yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir. Önerilen 3 sistemin tamamına ve alt ünitelerine uygulanan termodinamik değerlendirmeler ve parametrik çalışmaların sonucu sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda önerilen sistemlerin termodinamik verimlerinin yeterli olduğu, Afyon jeotermal kaynaklarından farklı çıktılar alınabileceği görülmüştür. Verimlerin yüksek olması yapılabilir olduğunu göstermektedir. Trijenerasyon üretim için kullanılan entegre enerji üretim sistemleri yüksek performans, düşük maliyet ve düşük emisyonlar sebebiyle faydalı ürünlerin üretilmesinde alternatif olarak görülmektedir. Çevresel sorunlardaki kaygıların artması küresel ısınma, iklim değişiklikleri ve ozon tabakasının zarar görmesi, enerjinin giderek daha pahalı olmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda entegre multijenerasyon sistemlerin önemini artırmaktadır.

Afyonkarahisar ilinde bulunan Ömer-Gecek sahası jeotermal kaynağının aktif kullanımları incelenmiş olup alternatif üretim seçenekleri önerilmektedir. Ömer-Gecek sahasında 11 adet aktif kuyu bulunmakta olup bu kuyulardan çıkan jeotermal suyun sıcaklıkları 80-120 °C arasındadır. Bu sahada elektrik üretimi Organik Rankine Çevrimi ile yapılmakta olup, kurulu güç 2,76 MWe eşdeğerindedir.

Afyonkarahisar ili Ömer-Gecek jeotermal sahasında bulunan elektrik üretim santralinin bir analizi yapılmıştır. Sistemin performansının değerlendirilmesinin ardından, bu jeotermal kaynaktan faydalanılabilecek diğer faydalı ürünleri üretecek farklı enerji santralleri tasarımı yapılmıştır. Çalışmada verilen ikinci sistem jeotermal kaynaktan

elektrik ve ısıtma üreten bir kojenerasyon sistemidir. Üçüncü sistem ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi sağlayan bir tri-jenerasyon sistemidir. Son olarak da ısıtma, soğutma ve elektriğe ilaveten hidrojen üreten bir multijenerasyon sistem tasarlanmıştır. Bu sistemlerin şematik çizimlerinde her bir akış numaralandırılmış ve bu akışlara ait termodinamik veriler ve denklemler kullanılarak Engineering Equation Solver (EES) yazılımı vasıtasıyla analiz edilmiştir. Elektrik üretimleri kıyaslandığında Afyon ORC sistemi net 2629 kW kapasitesinde, kojenerasyon sistem 1985 kW, tri-jenerasyon sistem 758.3 kW ve multijenerasyon sistem 468 kW kapasitesindedir. Enerji verimlerine bakıldığında Afyon ORC santrali %11,9 enerji %30,2 ekserji verimine sahipken, kojenerasyon sistemin enerji ve ekserji verimleri %54,62 ve %49,81, tri-jenerasyon sistemin enerji ve ekserji verimleri %57,03 ve %50,94 ve multijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji verimleri de %59,14 ve %54,83 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca parametrik analizler de göstermiştir ki çevre sıcaklığındaki artış, jeotermal akışkanın debi ve sıcaklığındaki artışlar da sistem performansını olumlu şekilde etkilemektedir. Yapılan analizler kullanılarak bu yöntemlerin mevcut sistem ile karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen multijenerasyon, trijenerasyon ve kojenerasyon sistemlerin verimlerinin yüksek olduğu ve Afyonkarahisar jeotermal kaynaklarının kullanılarak farklı çıktılar alınabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak bu tez çalışması ile Afyonkarahisarda mevcut jeotermal kaynağı için farklı sistemler kurulabileceğini göstermiştir. Trijenerasyon ve multijenerasyon sistemlerinde yüksek verimler elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak Afyonkarahisar jeotermal kaynağı ya da benzer kaynaklar için multijenerasyon sistemlerin kurulabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6. KAYNAKÇA

- Acar C, Sorgun M, 2009, ‘Geothermal Energy:Current Status in Turkey with EU Perspective’,Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy S.145-154.
- Akan B, 2002, Jeotermal Sistemlerde Isı Taşınımının Modellenmesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 26, 3 – 16.
- Akan B, Süer S, 2009, Afyon İlinde Yer Alan Jeotermal Sahaların İncelenmesi, Termal ve Maden Suları Konferansı, İstanbul, 92-99.
- Akbay O, Yılmaz F, 2020, Flaş İkili Jeotermal Güç Üretim Santralinin Termodinamik Analizi ve Performans Karşılaştırması, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 445-461.
- Aksoy M, Ata S, Kahraman A, Şahin R, 2023, Türkiye’de ORÇ Destekli Jeotermal Enerji Santrallerinde Kullanılan Organik Akışkanların Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması, 15. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 26-29 nisan 2023, İzmir.
- Atalay Ö, 2004, Jeotermal Sistemlerin Ekserji Analizi: Kızıldere Örneği Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi 109 s. Denizli.
- Aydınöz M, 2005, Afyonkarahisar Bölgesinde Bulunan Kaplıca Sularının Mevsimsel Analizi, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, yüksek lisans tezi 107 s. Afyonkarahisar.
- Cimşit C, 2019, Jeotermal Isı Kaynaklı Organik Rankine Çevriminin (Orc) Farklı Organik Akışkanlar İçin Termodinamik Analizi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 39, 169 – 177.
- Çelik M, Sabah E, 2002, ‘The Geological And Tecnical Characterisation Of Ömer Gecek Geothermal Area And The Environmental Impact Assessment Of Geothermal Heating System İn Afyon, Turkey’ Environmental Geology, 41, 942–953.
- Çetin A, 2014 Ülkemizin Jeotermal Enerji Kapasitesi ve Yapılabilecekler, Geleceği önemseyenler Derneği

(<http://www.gonder.org.tr/wpcontent/uploads/2014/06/GEOTERMALENERJJC4%B0Ay%C5%9Feg%C3%BCl-%C3%87etin.pdf>).

Demir S, Memiş Ü, 2015, Afyonkarahisar Jeotermal Sahalarının Hidrojeokimyası ve Jeotermometre Uygulamaları, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 66-77.

Demirkol Z, Çunkaş M, 2014, Afyonkarahisar İli Yenilenebilir Enerji Potansiyeli, S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Dergisi, 2, 45 – 56.

Dincer I, Rosen M, 2007, Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. India: Elsevier.).

Doğanay H, Coşkun O, 2017-2020 Enerji Kaynakları, Vadi Grup 3. Baskı 2017, Sonçağ Yayıncılık 4. Baskı: Şubat 2020, 18 s. Ankara.

Durdu R Ş, 2014, Jeotermal Enerjinin Sağlık Turizmindeki Yeri Ve Türk Turizmine Olası Katkıları, Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 105 s. Ankara.

Erkul H, 2012, Jeotermal Enerjinin Ekonomik Katkıları ve Çevresel Etkileri: Denizli-Kızıldere Jeotermal Örneği, Yönetim Bilimleri Dergisi, 10, 1-30.

Güntürkün R, Güngör E, 2020, Jeotermal Isıtmada Oransal Vana Kullanılarak Enerji Verimliliği, Electronic Letters on Science & Engineering, 16, 84 – 92.

İmamoğlu Ş M, 2009, Tektonik Yapısı Ve Stratigrafisi Işığında Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Jeotermal Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.

Karahanoğlu N, 2019, Jeotermal Rezervuarlarla İlgili Sayısal Modelleme/Benzeşim Çalışmaları, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 43, 99 – 130.

Kervankıran İ, 2012, ‘Afyonkarahisar İlinde Jeotermal Enerji Kullanımı ve Sorunları’ Marmara Coğrafya Dergisi, 108-126.

Kozak M, 2020, Denizli İli Jeotermal Enerji Kaynakları ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, Yekarum E-Dergi, 5, 1 – 11.

Lund J W, Toth A N, 2021, Direct Utilization Of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Geothermics, 90, 101915.

- Ozan S, Yılmaz C, 2022, Jeotermal ve Güneş Destekli Güç Üretimi Ve Isıtma Sisteminin Termodinamik Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38, 1307 – 1320.
- Sabah E, Çelik M Y, 1999, Afyon Jeotermal Merkezi Isıtma Sistemi, Ekonomisi Ve Hava Kirliliğini Önlemedeki Katkısı, Madencilik Dergisi, 38, 3 – 14.
- Sarıkaya U, 2010, Niğde İli Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi 83 s. Niğde.
- Süzen A, Bayraktar B, 2022, Balıkesir’de Bulunan Jeotermal Kaynaklar ve Kullanım Alanları, Balıkesir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(2), 123-135.
- Şahin C, 2016, Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Sahalarda Organik Rankin Çevrimi (ORC) ile Elektrik Enerjisi Üretiminde Afyon Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. Modellemesi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84 s. Kütahya.
- Takan A, Kandemir Y, 2020, Türkiye’deki Jeotermal Enerjinin Birincil Enerji Arzı Yönünden Değerlendirilmesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı) 381 – 385.
- Tunç S, Selek B, Koca B, Selek Ü S, Balcı K, Yıldırım A, Kaypak B, 2023, Jeotermal Sahalarda Mikrosismik İzleme Ağlarının Kurulumu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38, 1307 – 1320.
- Yalçın M, 2016, Jeotermal Alanların Cbs Ve Uzaktan Algılama Teknikleri İle Araştırılması: Akarçay Havzası (Afyonkarahisar) Örneği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 169 s. İstanbul.
- Yüksel Y E, Öztürk M, 2019, Jeotermal Enerji Destekli Çok Fonksiyonlu Enerji Üretim Sisteminin Termodinamik Analizi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(1), 113-121.
- Zaim A, Çavşı H, 2018, Türkiye’deki Jeotermal Enerji Santrallerinin Durumu, Mühendis ve Makina, 59, 45-58.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita>, 20.03.2023
- 2- <https://www.solarrelax.com/ges-nedir-gunes-enerjisi-santrali-nedir>, 12.04.2023
- 3- <https://www.girisimhaberleri.com/cevre-dostu-uretim-ruzgar-turbini-nedir>, 12.04.2023
- 4- <https://www.dpumekatronik.com/hidroelektrik-enerjisi-nasil-uretilir/>, 12.04.2023
- 5- <https://yeo.com.tr/projeler/guc-enerji/biyogaz-biyokutle-enerji-santrali>, 12.04.2023
- 6- https://www.researchgate.net/figure/Dry-Steam-Geothermal-Power-Plant-23_fig1_354293547, 11.05.2023
- 7- <http://yenenka.blogspot.com/p/jeotermal-enerji.html>, 13.05.2023
- 8- <https://www.samiaenergy.com/the-heat-beneath-our-feet.html>, 17.05.2023
- 9- <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf;jsessionid=nHmfv8L2yezU0vWIw2wvd6dS?dergiKodu=4&cilt=33&sayi=387&sayfa=70&yaziid=11967>, 19.05.2023