

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DENİZLİ'DE GÜNEŞ-JEOTERMAL ENERJİLİ HİBRİD  
SİSTEMLERİN TERMODİNAMİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALPER ÇEÇEN**

**DENİZLİ, ARALIK - 2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**DENİZLİ'DE GÜNEŞ-JEOTERMAL ENERJİLİ HİBRİD  
SİSTEMLERİN TERMODİNAMİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALPER ÇEÇEN**

**DENİZLİ, ARALIK - 2019**

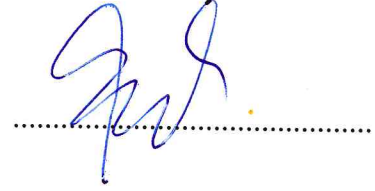
## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Alper Çeçen** tarafından hazırlanan “Denizli’de Güneş-Jeotermal Enerjili Hibrid Sistemlerin Termodinamik Analizi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 30.12.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

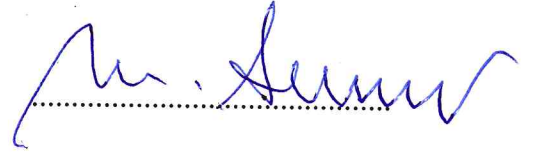
Danışman  
Prof. Dr. Rasim KARABACAK



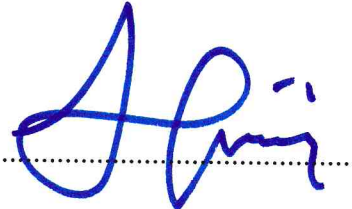
Üye  
Prof. Dr. Fethi HALICI  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Mustafa ACAR  
Süleyman Demirel Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/01/2020 tarih ve 04/15... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

  
**Alper ÇEÇEN**

## ÖZET

### DENİZLİ'DE GÜNEŞ-JEOTERMAL ENERJİLİ HİBRİD SİSTEMLERİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER ÇEÇEN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. RASİM KARABACAK)

DENİZLİ, ARALIK - 2019

Dünya’da gün geçtikçe enerji ihtiyacı artmaktadır. Bu ihtiyaç için güç üretirken kaynakların sürdürülebilir olması ve ekolojiye verilen zararı azaltma amacı, fosil kaynaklardan vazgeçilip veya yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte hibrit sistemlere geçişi hızlandırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de de önemli ölçüde kullanılabilir duruma gelmiştir.

Hibrit sistemlerde termodinamiğin ikinci kanuna göre maksimum verimi elde etmek ve sürekli enerji üretimi yapılırken jeotermal enerji kaynağının sürdürülebilir olması amacıyla, kızdırma veya buharlaşma süreçlerinde güneş enerjisinden faydalanılmıştır.

Parabolik oluk tipi güneş kolektörleriyle desteklenen tek ve çift flaşlı jeotermal enerji sistemlerin performansını değerlendirmek amacıyla Denizli-Kızıldere jeotermal rezervuar koşulları dikkate alınmış, Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak sistemlerin termodinamik analizi yapılmıştır.

Denizli bölgesinde bulunan jeotermal rezervuarlardaki tüketimin değerlendirilmesi yapılırsa; sistem güç çıkışı sabitken, jeotermal akışkan tüketiminde hibrit tek flaşlı sistem için %16’ya ve hibrit çift flaşlı sistem için %19’a varan düşüşler olabileceği belirtilmiştir. Bu da güneş jeotermal enerjili hibrit sistemlerin rezervuarları korumak ve sürdürülebilirliğini sağlamak için cazip bir çözüm olabileceğini göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Güneş Enerjisi, Hibrit, Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörü, Organik Rankine Çevrimi, Termodinamik Analiz, Ekserji

## **ABSTRACT**

### **THERMODYNAMIC ANALYSIS OF SOLAR-GEOTHERMAL ENERGY HYBRID SYSTEMS IN DENİZLİ**

**MSC THESIS**

**ALPER ÇEÇEN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. RASİM KARABACAK)**

**DENİZLİ, DECEMBER 2019**

The need for energy is increasing day by day in the world. The sustainability of resources while generating power for this need and the aim of reducing the damage to ecology accelerate the abandonment of fossil resources or the transition to hybrid systems with renewable energy sources. Renewable energy sources such as geothermal energy one in which the whole world has come to Turkey also significantly used condition.

In hybrid systems, solar energy has been utilized in superheating or evaporation processes in order to obtain maximum efficiency according to the second law of thermodynamics and to sustain the geothermal energy source while producing continuous energy.

Denizli-Kızıldere geothermal reservoir conditions were taken into consideration in order to evaluate the performance of single and double flash geothermal energy systems supported by parabolic trough type solar collectors and thermodynamic analysis of the systems were made using Engineering Equation Solver (EES) software.

If the consumption of geothermal reservoirs in Denizli is evaluated; While the system power output is constant, it is stated that geothermal fluid consumption may decrease up to 16% for hybrid single flash system and 19% for hybrid dual flash system. This has shown that solar geothermal hybrid systems can be an attractive solution to maintain and maintain reservoirs.

**KEYWORDS:** Solar Energy, Hybrid, Parabolic Trough Type Solar Collector, Organic Rankine Cycle, Thermodynamic Analysis, Exergy

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>2</b>
2.1 Jeotermal Akışkanın Güneş Enerjisi ile Isıtılması.....	4
2.2 Hibrit Güneş-Jeotermal Güç Sistemlerinin Avantajları.....	8
2.3 Hibrit Güneş-Jeotermal Güç Sistemlerinin Dezavantajları.....	9
<b>3. JEOTERMAL VE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ .....</b>	<b>10</b>
3.1 Jeotermal Enerji Potansiyeli.....	10
3.1.1 Dünyanın Jeotermal Enerji Potansiyeli .....	13
3.1.2 Türkiye’deki Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları... ..	15
3.1.3 Türkiye’deki Jeotermal Güç Santralleri .....	17
3.1.4 Denizli’de Bulunan Jeotermal Kuyuların Termodinamik Özellikleri.....	18
3.2 Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	19
3.2.1 Dünyada Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	21
3.2.2 Türkiye’deki Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	23
3.2.3 Türkiye’deki Güneş Enerjili Güç Santralleri .....	24
3.2.4 Denizli’de Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	25
<b>4. İLGİLİ ISIL GÜÇ ÇEVİRİMLERİ .....</b>	<b>27</b>
4.1 Jeotermal Enerjili Güç Çevrimleri.....	27
4.1.1 Doğrudan Buhar Çevrimi (Kuru Buhar).....	27
4.1.2 İdeal Rankine Çevrimi.....	28
4.1.3 Flaşlı Çevrimler.....	29
4.1.4 İkili (Binary) Çevrim .....	33
4.2 Güneş Isıl Enerjisi.....	35
4.2.1 Doğrusal Yoğunlaştırıcı Sistem .....	35
4.3 Jeotermal ve Güneş Enerjili Hibrit ORÇ Sistemleri.....	39
4.4 Çift Akışkanlı Santrallerde Kullanılan İkincil Akışkanlar .....	41
<b>5. DENİZLİ KOŞULLARINDA HİBRİT SİSTEM MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI .....</b>	<b>44</b>
5.1 EES Bilgisayar Programı .....	44
5.2 İlgili Hibrit Çevrimlerin Şemaları .....	45
5.3 Çevrimlerin Termodinamik Analizleri İçin Yapılan Kabuller .....	47
5.4 Termodinamik Analizde Gereken Eşitlikler .....	48
5.5 Jeotermal Rezervuar .....	49
5.6 Güneş Tarlası Modeli.....	50
5.7 Türbin.....	52
5.8 Pompa Analizi .....	54
5.9 Isı Değiştiricisi ve Kondenser Analizi .....	54

<b>6.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>59</b>
6.1	Model Doğrulaması .....	59
6.2	Tek Flaşlı Hibrit Sistem .....	60
6.3	Çift Flaşlı Hibrit Sistem .....	63
6.4	Çift Akışkanlı Jeotermal Güç Santrali .....	65
6.5	Yıllık Performans .....	67
6.5.1	İlave Güç Üretim Durumu .....	67
6.5.2	Jeotermal Akışkan Debisini Azaltma Durumu .....	68
6.6	Farklı İkincil Akışkanların Değerlendirilmesi .....	69
6.7	Ekonomik Analiz .....	70
6.7.1	Jeotermal Güç Santrallerinin Maliyetlerini Etkileyen Faktörler .....	71
6.7.2	Maliyet Tahminleri .....	72
6.7.3	Çalışma Maliyetleri .....	73
6.7.4	Bakım Maliyetleri .....	74
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>76</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>79</b>
<b>9.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>84</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Tek basınçlı jeotermal-güneş enerjili ORÇ düzeni.....	4
Şekil 2.2: İki basınçlı jeotermal-güneş enerjili ORÇ düzeni .....	4
Şekil 2.3: Hibrit güneş – jeotermal enerjili sistem şematığı .....	5
Şekil 2.4: Doğrudan güneş enerjisi ısıtma sistemine sahip bir ORÇ tesisi.....	6
Şekil 2.5: Dolaylı güneş ısıtma sistemine sahip bir ORÇ tesisi.....	6
Şekil 2.6: Önerilen hibrit sistemlerin (a) ve (b) şematik gösterimi ile sıcaklık-entropi düzleminde gösterimi.....	7
Şekil 2.7: Jeotermal ve güneş enerji çıkışı, tipik bir bahar günü için ortalama net güç üretimi.....	8
Şekil 3.1: Jeotermal enerji kaynağı .....	10
Şekil 3.2: Jeotermal enerji kaynağı ve sıcaklığa göre kullanım alanları .....	12
Şekil 3.3: Jeotermal kaynakların dünya üzerinde dağılımı: kırmızı bölgeler, yüksek enerji yoğunluğuna sahip jeotermal kullanım sıcaklıkları 170-300 °C arasındadır, sarı bölgelerde ise 70-170 °C arasındadır. ....	13
Şekil 3.4: Ülkemizdeki potansiyel jeotermal alanların haritası .....	15
Şekil 3.5: Türkiye’deki jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası .....	16
Şekil 3.6: Güneş enerjili pompanın çalışması.....	20
Şekil 3.7: Güneş fırını.....	21
Şekil 3.8: 2015 yılı güneş enerjisi kapasite artışı ve kurulu güç bakımından ilk on ülke.....	22
Şekil 3.9: Denizli’ye ait güneş ışınımı meteoroloji verileri 2004-2016 yılları .....	26
Şekil 3.11: Denizli yıllık ortalama radyasyon değerleri .....	26
Şekil 4.1: Kuru buhar çevrim şeması .....	28
Şekil 4.2: İdeal Rankine çevrimi ve T-S diyagramı. ....	29
Şekil 4.3: Flaşlama işlemine ait basınç-entalpi diyagramı .....	30
Şekil 4.4: Tek flaşlı buharlı güç santrali şematığı .....	31
Şekil 4.5: Çift flaşlı buhar çevrimli santral şematığı.....	33
Şekil 4.6: Binary (İkili) jeotermal güç santralinin tesis şeması .....	34
Şekil 4.7: Basit ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı .....	35
Şekil 4.8: Parabolik oluk tipi güneş kolektörleri.....	36
Şekil 4.9: Doğrusal fresnel toplayıcıları .....	37
Şekil 4.10: (a) Her iki tarafı açık vakumlu parabolik güneş alıcı tüp, (b) vakumlu tüpün iç yapısı .....	38
Şekil 4.11: Parabolik çanak yoğunlaştırıcı .....	39
Şekil 4.12: İspanya'daki güneş kuleleri. ....	39
Şekil 4.13: Hibrit ikili ORÇ’li elektrik santrali.....	40
Şekil 4.14: Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri .....	40
Şekil 4.15: Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı.....	42
Şekil 5.1: Tek flaşlı hibrit sistem .....	46
Şekil 5.2: Çift flaşlı hibrit sistem şeması .....	46
Şekil 5.3: Çift akışkanlı hibrit sistem şeması.....	47
Şekil 5.4: Rezervuarın ele alınan termodinamik durumları.....	50
Şekil 5.5: Türbin şeması .....	53
Şekil 5.6: Pompa şeması .....	54
Şekil 5.7: Isı değiştiricisi(a) ve yoğuşturucu(b) şeması.....	55

<b>Şekil 5.8:</b> Isı değiştiricisi için jeotermal ve ikincil akışkanın sıcaklık değişimi ...	55
<b>Şekil 5.9:</b> Türbin.....	57
<b>Şekil 5.10:</b> Pompa .....	57
<b>Şekil 5.11:</b> Eşanjör .....	57
<b>Şekil 5.12:</b> Kondenser.....	57
<b>Şekil 5.13:</b> Ayrıştırıcı .....	57
<b>Şekil 5.14:</b> Flaşlama ünitesi .....	57
<b>Şekil 6.1:</b> Tek flaşlı santral için türbin giriş basıncının net güce etkisi.....	61
<b>Şekil 6.2:</b> Tek flaşlı santral için türbin giriş basıncının enerji ve ekserji verimine etkisi .....	62
<b>Şekil 6.3:</b> Tek flaşlı santral için net gücün ekserjiye göre optimizasyonu .....	63
<b>Şekil 6.7:</b> Tek flaşlı ve çift flaşlı santral eşanjörleri ile güneş enerjisi ısıl gücünün fonksiyonu olarak ilave güc çıkışı. ....	64
<b>Şekil 6.8:</b> Tek flaşlı elektrik santrali (a) ve çift flaşlı elektrik santrali (b) için ayırma basıncının bir fonksiyonu olarak rezervuarın güc çıkışı. ....	64
<b>Şekil 6.9:</b> Çift akışkanlı santral için T-s diyagramı.....	65
<b>Şekil 6.10:</b> Çift akışkanlı santralin ısı değiştiricisindeki sıcaklık değişimi .....	65
<b>Şekil 6.11:</b> Çift akışkanlı santral için net gücün ekserjiye göre optimizasyonu ...	66
<b>Şekil 6.12:</b> İlave güc üretme durumunda güneş enerjisi ve jeotermal enerjili hibrit santrallerin yıllık performansı; (a) tek flaşlı, (b) çift flaşlı .....	68
<b>Şekil 6.13:</b> Hibrit santrallerinin jeotermal akışkan debisi değişiminde yıllık performansı; (a) tek flaşlı, (b) çift flaşlı.....	69
<b>Şekil 6.15:</b> Santralin özgül maliyetinin güce göre değişimi. ....	73

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Hibrit güneş-jeotermal sistemlerin literatür özeti .....	3
<b>Tablo 3.1:</b> Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü listesi .....	14
<b>Tablo 3.2:</b> Türkiye’de devrede olan jeotermal enerjili güç santralleri.....	17
<b>Tablo 3.3:</b> Denizli-Kızıldere jeotermal bölgesine ait kuyuların özellikleri .....	18
<b>Tablo 3.4:</b> Türkiye’de kurulu gücü en yüksek güneş santralleri.....	24
<b>Tablo 4.1:</b> Türkiye’de kurulu jeotermal santral türleri .....	27
<b>Tablo 4.2:</b> Parabolik oluk tipi güneş kolektörlerin bazı özellikleri .....	36
<b>Tablo 4.3:</b> Güneş parabolik oluk alanlarında kullanılan ısı transfer akışkanları .	37
<b>Tablo 4.4:</b> İkincil akışkan özellikleri .....	41
<b>Tablo 5.1:</b> Denizli hibrit sistemin referans koşulları .....	48
<b>Tablo 5.2:</b> Jeotermal rezervuar özellikleri.....	49
<b>Tablo 5.3:</b> EuroTrough kolektör özellikleri .....	51
<b>Tablo 5.4:</b> Santral üniteleri için kütle, enerji ve ekserji denklemleri.....	57
<b>Tablo 6.1:</b> Tek flaşlı hibrit şema sonuçları.....	61
<b>Tablo 6.2:</b> Enerji ve ekserjiye dayalı optimizasyonlar ile santrallerden elde edilen optimum değerler .....	66
<b>Tablo 6.3:</b> Denizli için çevrimlerin optimum türbin giriş basınçlarına göre enerjiye dayalı net güçleri, enerji ve ekserjetik verimleri.....	67
<b>Tablo 6.4:</b> Çift akışkanlı santralde kullanılan farklı ikincil akışkanların optimum değerleri.....	70
<b>Tablo 6.5:</b> Denizli-Kızıldere bölgesi için maliyetler ve geri ödeme süreleri. ....	70
<b>Tablo 6.6:</b> Tek flaşlı güç santralleri Tahmini maliyet.....	72
<b>Tablo 6.7:</b> ORÇ tahmini toplam maliyetleri.....	73
<b>Tablo 6.8:</b> Çift flaşlı güç santralleri tahmini maliyetleri.....	73
<b>Tablo 6.9:</b> Jeotermal güç santrallerinin çalışma maliyetlerinin dağılımı .....	75

## SEMBOL LİSTESİ

- $\eta$  : Verim  
 $\dot{m}$  : Kütleli debi (kg/s)  
 $^{\circ}\text{C}$  : Santigrat  
 $h$  : Entalpi (kJ/kg)  
 $X$  : Ekserji (kW)  
 $s$  : Özgöl entropi (kJ/kg)  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\dot{Q}$  : Birim zamanda ısı geçişi (kW)  
 $P$  : Basınç (bar)  
 $T$  : Sıcaklık (K veya  $^{\circ}\text{C}$ )  
 $V$  : Hız (m/s)  
 $\dot{W}$  : Birim zamanda yapılan iş (kW)  
 $\psi$  : Birim kütle ekserjisi (kJ/kg)  
 $f$  : Doymuş sıvı  
 $\dot{c}$  : Çıkış  
 $0$  : Çevre hali, ölü hal  
 $g$  : Giriş  
 $t$  : Türbin

## ÖNSÖZ

Tez danışmanım Prof. Dr. Rasim KARABACAK'a şükranlarımı sunmak isterim. Sorularım olduğunda bana araştırmam konusunda çok yol gösterdi. Araştırmalarımın büyük bir kısmını Merkez Kütüphanesinde tamamladığım Pamukkale Üniversitesi'ne gerekli imkânları bizlere sunduğu için teşekkür ederim.

Ayrıca, ailemin bana verdiği tüm teşvik ve destekler için çok minnettarım. Yüksek lisans eğitimim boyunca benim en önemli isteklendirme kaynaklarım ailem ve can yoldaşım Rabia KALKAN'dı.

Yüksek lisans dönem arkadaşlarım Gökhan EKİNCİ'ye, Ali Kürşad ARICIOĞLU'na, Ali GÜRCAN'a, arkadaşlarım Erdem Akın TEMEL'e ve Aydın ÇOBANYILDIZI'na, bana her zaman birçok konuda yardım ettikleri için teşekkür etmek istiyorum. Son olarak, Prof. Dr. Rasim KARABACAK'a bana tez danışmanlığı yaptığı ve saatlerini ayırdığı için tekrar teşekkür ederim.

Enerji, hayatımızın önemli bir parçasıdır, ancak onu üretmenin daha iyi ve daha verimli yollarını bulmamız gerekir.

# 1. GİRİŞ

Yenilenebilir, sürdürülebilir, ucuz, güvenilir, çevre dostu ve yeşil enerji türleri olan jeotermal enerji ve güneş enerjisi, birlikte hibrit sistem olarak ülkemizde ve Denizli’de güç üretimi için kullanılabilir. Güneş enerjisi belirli bir bölgede, belirli iklim koşullarına göre sadece gündüz bulunurken, jeotermal enerji mevsime göre değişim göstermez.

Jeotermal enerji kaynakları, jeotermal enerji santrallerinin devreye alınmasıyla termal olarak kısa süreli atmosferik olaylardan etkilenmeyerek, rezervuardaki geri basma koşulları devam ettiği sürece yenilenebilir özelliğini korurlar. Günümüzde Organik Rankine Çevrimi prensibine göre çalışan elektrik santrallerinde düşük sıcaklıklardaki kaynaklar da elektrik üretmek için kullanılabilirler.

Bu iki yenilenebilir enerji kaynağının hibrit bir şemada birleştirilerek, kaynakların her birinin sağladığı faydaları arttırabilecek hibrit santrallerin termodinamik özellikleri sunulmaktadır. Bununla birlikte literatüre göre, jeotermal santrallerin kurulması, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinin kurulmasından daha uzun süreceği görülmüştür. Denizli bölgesindeki her iki kaynak için yüksek gelişme potansiyeli dikkate alınarak, jeotermal enerjiyi, yoğunlaştırıcı güneş enerjisi teknolojisi ile birleştirerek tek flaşlı çevrim, çift flaşlı çevrim ve çift akışkanlı hibrit sistemlerin hem teknik hem de ekonomik yönleri değerlendirilmiştir.

Hibrit sistemler sadece jeotermal enerji ile çalışan santrale göre daha güvenilir, maliyet etkinliği daha yüksek, çevre dostu ve su kullanımını azaltması bakımından da daha avantajlı olmaktadır. Birincil amaç, bu hibrit sistemlerin termodinamik açıdan ve modelleme yoluyla etkinliğini değerlendirmektir. İkincil amaç, hibridizasyon yoluyla, özellikle jeotermal enerji bakımından zengin olan Denizli bölgesinde jeotermal kaynakların daha uzun ömürlü olmasını sağlayabilecek bir tez ortaya çıkarmaktır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda hibrit güneş enerjili ve jeotermal enerjili sistemlerden enerji üretimine çok önem verilmiştir (DiMarzio ve diğ. 2015; Ghasemi ve diğ. 2014; Kondili ve diğ. 2006; Mathur 1979). Hibrit güneş-jeotermal enerji santrallerinin maliyet açısından rekabetçi olabileceği görülmüştür.

Lentz ve Almanza (2006), buhar miktarını arttırmak ve jeotermal akışkanın entalpisini artırmak için parabolik oluk tipi güneş paneli kullanmanın uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Buhar-su akış hızındaki artış, tuz çözünürlüğünün arttırmasından dolayı bazı tuzların birikmesini önleyebileceği görülmüştür.

Kondili ve diğ. (2006), fosil yakıt tüketimini en aza indirmek ve jeotermal enerjiyi kullanarak bir jeotermal-güneş hibrit sistem tasarımı için bütünleşmiş bir sistem önermişlerdir. Ayrıca, önerilen sistem yapılandırmasının ekonomik olarak da cazip olduğunu gösteren seçilmiş bir alanda uygulamışlardır.

Ghasemi ve diğ. (2014), Organik Rankine Çevriminde jeotermal akışkanın bir kısmını buharlaştırmak için sisteme paralel olarak kullanılan düşük sıcaklıklı bir güneş enerjisi sistemini hibritlemek için bir model tasarlamışlardır. Hibrit sistemin yıllık performansı, belirli bir alan ait güneş enerjisi verileri incelenmiş ve optimize edilmiştir. Tek başına jeotermal sisteme kıyasla, yıllık enerji üretiminde %5,5'lik bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, hibrit sistem, jeotermal veya güneş enerjisi sistemlerine kıyasla %3,4'e kadar daha yüksek bir ikinci yasa verimine sahip olduğu, ek olarak, hibrit sistemde %17,9'a varan güneş enerjisi verimliliği artışı görülmüştür.

Ayub ve diğ. (2015), güneş-jeotermal hibrit sistemi için bütünleşmiş bir model geliştirmişler ve hibrit sistem için tek başına jeotermal sisteme kıyasla Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetlerini %2 oranında azaltılabileceğini, tek başına jeotermal ORÇ'nin optimizasyon sağlayacağı, yaklaşık %8'lik bir düşüşe neden olabileceğini bildirmişlerdir.

Mevcut literatüre göre, hibrit güneş-jeotermal enerji üretimi, son yıllarda birçok araştırmanın odak noktası olmuştur ve farklı birçok hibrit sistem

araştırılmıştır. Tablo 2.1’de farklı hibrit güneş-jeotermal sistemler hakkındaki bilgiler literatürden özetlenmiştir.

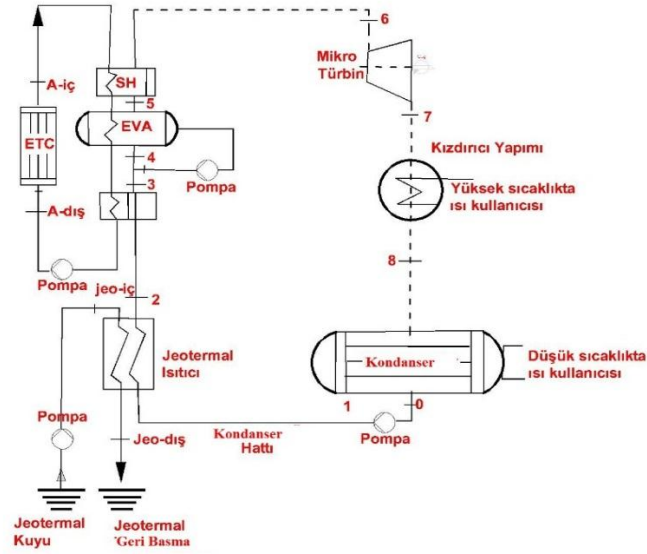
**Tablo 2.1:** Hibrit güneş-jeotermal sistemlerin literatür özeti

Yazarlar, yıl	Jeotermal enerji santrali (mevcut /model) ve konumu	Jeotermal rezervuar sıcaklığı ve jeotermal akışkan debisi	Ana güç döngüsü türleri	Çalışma akışkanı	Hibridizasyon yaklaşımı ve çalışma şekli
Ayub ve diğ. 2015	Mevcut, Nevada, ABD	135°C, 620kg/s	Kritik altı jeotermal ikili santral (ORÇ)	İzopentan	Güneş sistemi dâhil
Zhou ve diğ. 2014	Model, Avustralya	150 °C, 50kg/s	Süperkritik/kritik altı olmayan jeotermal ikili santral (ORÇ)	İzopentan	Çalışma akışkanı kızgın
Peterseim ve diğ. 2014	Model, Avustralya	150-200 °C	Tek flaşlı jeotermal santral	Buhar	Jeotermal akışkanını güneş enerjisiyle kalitesini arttırmak
Greenhut ve diğ. 2010	Mevcut, yedi üniteli çevrim binary santral, ABD	150°C, 100kg/s (jeotermal akışkan geri basma sıcaklığı>70 °C)	Süperkritik jeotermal flaşlı-binary/ikili santral	R-134a (101-180 °C)	Çalışma akışkanı kızdırma, jeotermal akışkanı ön ısıtma
Manente ve diğ. 2011	Mevcut, ABD	154,5°C, 457,1 kg/s (jeotermal akışkan geri basma sıcaklığı>62.8 °C)	Subkritik jeotermal ikili santral (ORÇ)	İzobütan endüstriyel seviye	Jeotermal akışkan ön ısıtmalı
Zhou ve diğ. 2011	Model, Avustralya	180°C, 50 kg/s	Subkritik jeotermal ikili santral (ORÇ)	İzopentan	Jeotermal akışkan ön ısıtmalı
Astolfi ve diğ. 2011	Model, İtalya ve ABD	150 C, 100 kg/s (jeotermal akışkan geri basma sıcaklığı)	Süperkritik jeotermal ikili çevrim	R-134a (207 °C ‘a kadar)	Jeotermal akışkan ön ısıtmalı
Mir ve diğ.2011	Model, Şili	250 °C	Tek Flaşlı jeotermal santral	Buhar	Çalışma akışkanı kızgın buhar
Boghossian 2011	Model, USA	150 °C, 100kg/s	Çift Sıcaklık jeotermal Kalina çevrimi	NH3-H2O karışımı	Çalışma akışkanı kızgın karşım
Todorovic 2009	Mevcut, Husavic, İzlanda	125 °C, 90kg/s	Jeotermal Kalina Çevrim	NH3-H2O karışımı	Jeotermal akışkanını güneş enerjisiyle kalitesini arttırmak

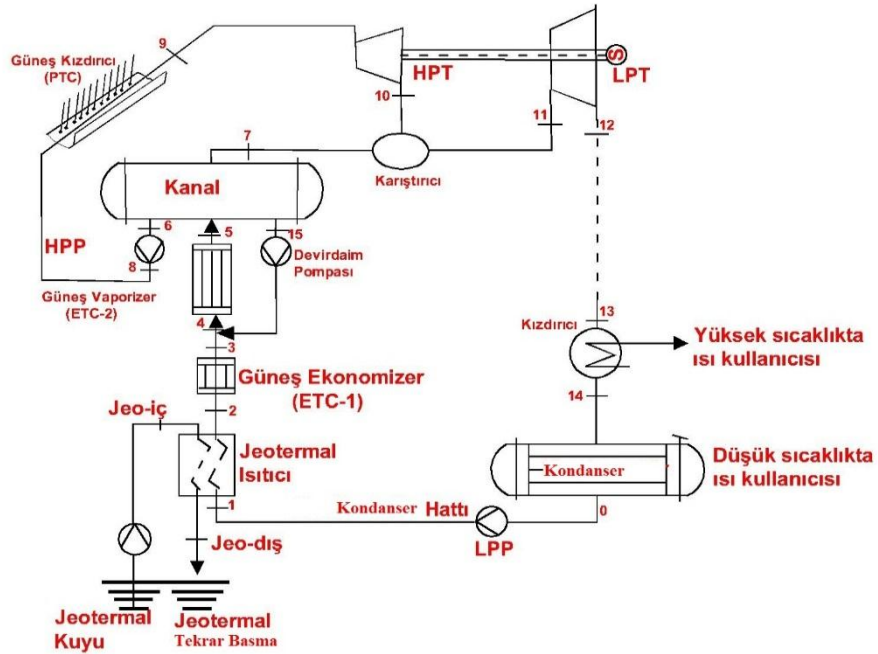


## 2.1 Jeotermal Akışkanın Güneş Enerjisi ile Isıtılması

Güneş enerjili ön ısıtma sistemi, jeotermal akışkan sıcaklığını veya kuruluk derecesini artırarak jeotermal akışkanı ön ısıtma yapmak için kullanır. Tempesti ve diğ. (2012), düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynak (yani 90 °C) ile güçlendirilmiş iki farklı Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) şemasını Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görüldüğü gibi modellemiştir. Her iki sistemde de R135a, R236fa ile karşılaştırıldığında çevrim ve ekserji verimliliği açısından R245fa ile en iyi performans elde edildiği görülmüştür.

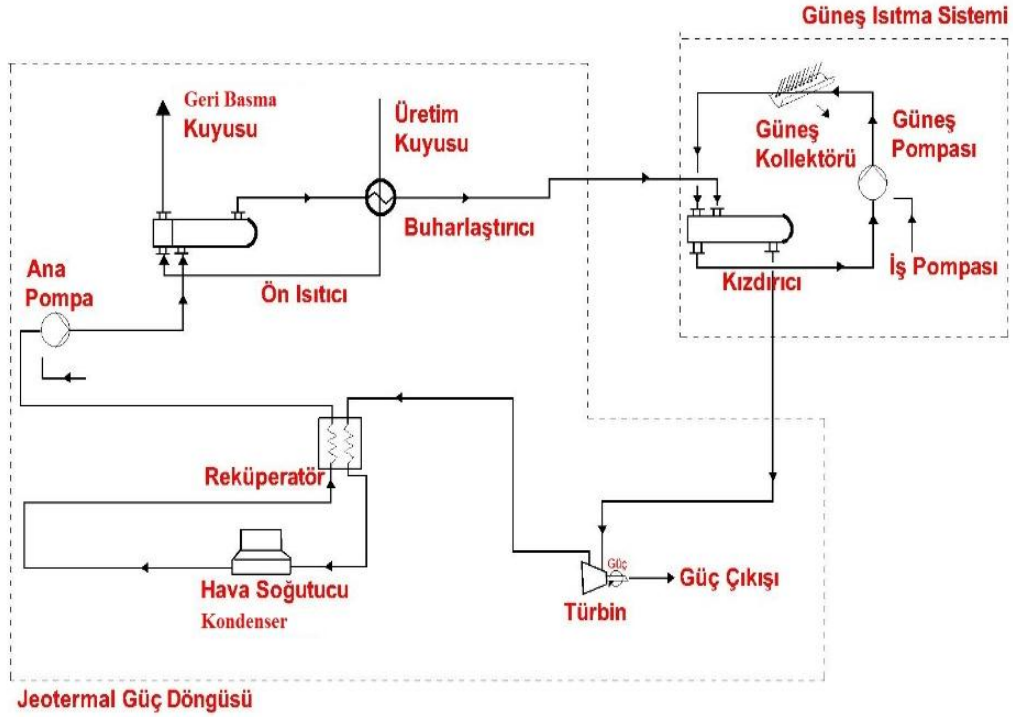


Şekil 2.1: Tek basınçlı jeotermal-güneş enerjili ORÇ düzeni (Tempesti ve diğ. 2012)



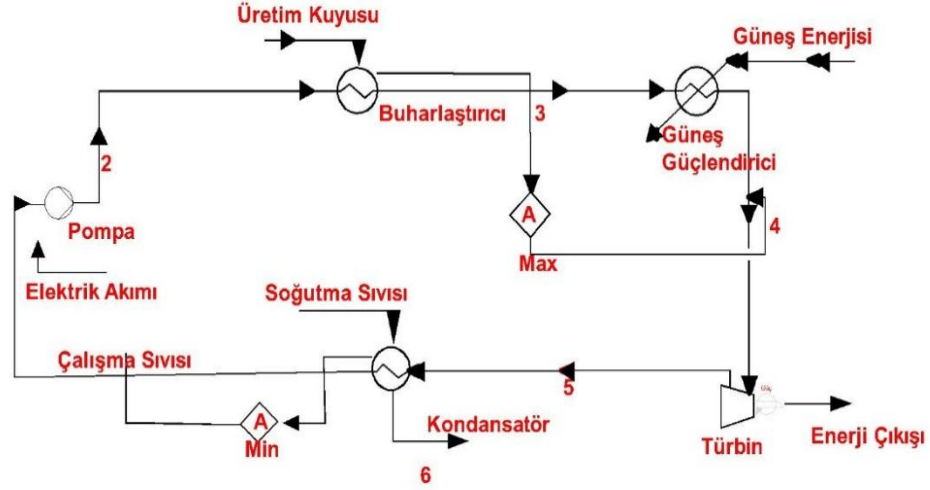
Şekil 2.2: İki basınçlı jeotermal-güneş enerjili ORÇ düzeni (Tempesti ve diğ. 2012)

Zhou (2014) hibrit güneş – jeotermal enerji üretiminde hem alt-kritik hem de süperkritik ORÇ platformlarında çalışmıştır (Şekil 2.3). Termodinamik analizde, süperkritik ORÇ'yi kullanan hibrit tesisin, yaklaşık 8000 m<sup>2</sup>'den daha büyük bir güneş enerjisi alanında (yani güneş ekserji verimi > %66), alt-kritik ORÇ'yi kullanmaya göre yaklaşık %4–17 arasında daha fazla güç üretilbileceğini göstermiştir. Süperkritik ve kritik olmayan hibrit tesisler, belirli koşullar altında bulunan iki bağımsız tesisten maksimum yıllık %19 ve %15 daha fazla elektrik üretmiştir.

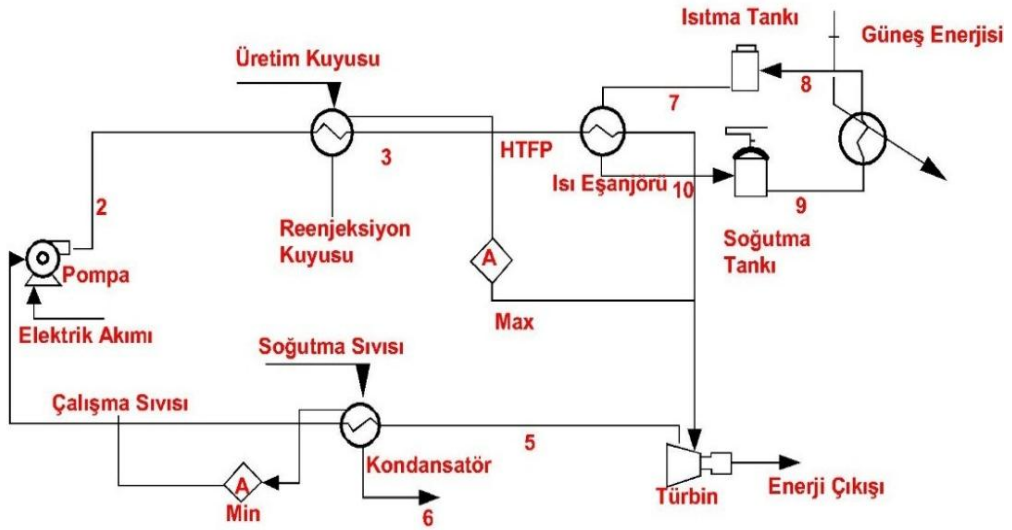


**Şekil 2.3:** Hibrit güneş – jeotermal enerjili sistem şematığı (Zhou 2014)

Zhou ve diğ. (2011) hibrit güneş-jeotermal iki sistem önermiştir: Şekil 2.4'te biri güneş enerjisi deposunun olmadığı doğrudan sistem, diğeri ise Şekil 2.5'te bir depolama sistemi içeren dolaylı sistemdir. Her iki yapılandırma da jeotermal enerji santralinin performansını artırabilirken, dolaylı sistem daha iyi performans göstermiştir. Hibrit enerji santralının genel performansı, kolektör yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Doğrudan sistem, hibrit enerji santralının performansını net elektrik üretiminde %12,7 ve termal verimde maksimum %7,5 artırırken, dolaylı olanı net elektrik üretiminde sırasıyla %29,0 ve %16,6 artış sağladığını göstermişlerdir.



Şekil 2.4: Doğrudan güneş enerjisi ısıtma sistemine sahip bir ORÇ tesisi (Zhou ve diğ. 2011)



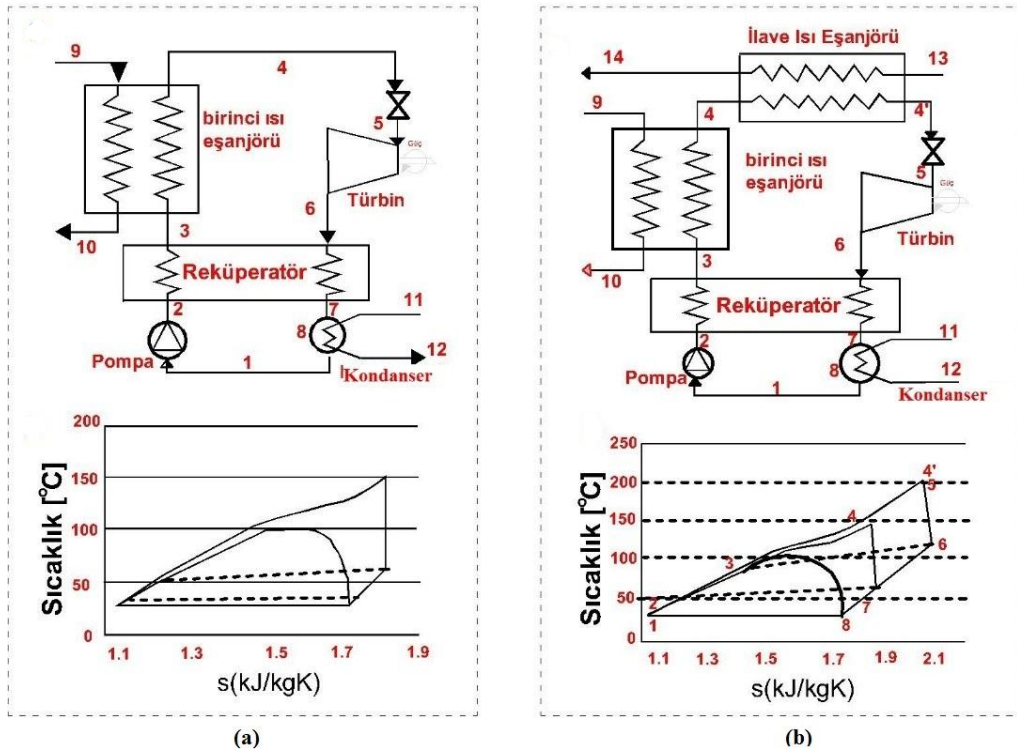
Şekil 2.5: Dolaylı güneş ısıtma sistemine sahip bir ORÇ tesisi (Zhou ve diğ. 2011)

Ahuachapán jeotermal alanında, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile bir hibrit sistem kurulmuştur (Alvarenga ve diğ. 2008). Alandaki rezervuar sıcaklığı 225 °C idi. Kuyuların çoğu için, kuyu başı koşullarında karışık akışkanlar 4-7 barg, 154-160 °C ve %15-20 kütleli buhar verimi olmuştur. Sabah saat 09.00'dan akşam 17.00'e kadar olan 300 m x 400 m'lik bir güneş alanı, 4,4 barg giriş buhar basıncı olan bir türbinden 2,5 MW'a eşdeğer 5,8 kg/s buhar üretebilir. Buhar akış hızını arttırmak için güneş enerjisi kullanılmıştır. Isı transfer akışkanı (HTF) sıcaklığı 225 °C 'den yüksek olduğunda güneş verimliliğinden önemli ölçüde düşüş yaşanmıştır.

Enedy ve Rudisill (2009), The Geysers jeotermal sahasındaki pompa istasyonuna kısmen enerji vermek için 1000 kW güneş enerjisi yatırımının finansal

getirisinin pozitif olduğunu bildirmiştir. Bu projede elektrik üretmek için fotovoltaik paneller kullanılmıştır.

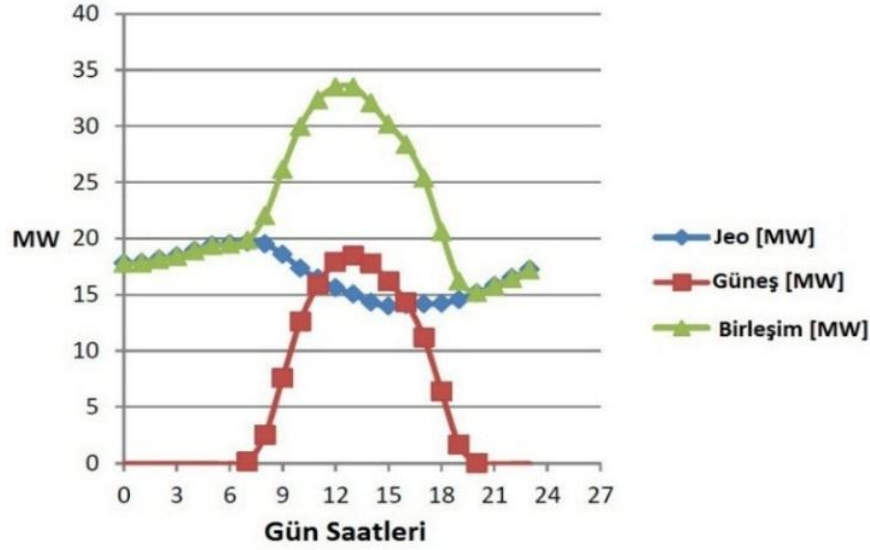
Astolfi ve diğ. (2011), jeotermal kaynağın kullanımını optimize etmek için Şekil 2.6'da güneş parabolik oluk tipi kolektörlere sahip bir süperkritik ORÇ hibrit sistem önermiştir. Şekil 2.6 (a)'da süperkritik rejeneratif ORÇ'nin şematik ve sıcaklık-entropi düzlemi üzerindeki şeması, Şekil 2.6 (b)'de model hesaplamaları için kullanılan hibrit sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Her ne kadar termal depolama hibrit tesisin esnekliğini artıracak olsa da oldukça yüksek kapasite faktörleri sağlayan ve kısa süreli insolasyon olmaması durumunda türbin için güvenli çalışmayı garanti edebilen jeotermal kaynağın sürekli mevcudiyeti nedeniyle termal depolamanın gereksiz olduğunu savunmuşlardır.



**Şekil 2.6:** Önerilen hibrit sistemlerin (a) ve (b) şematik gösterimi ile sıcaklık-entropi düzleminde gösterimi (Astolfi ve diğ. 2011)

2012 yılında Enel Green Power, Nevada'da ticari ölçekli bir hibrit jeotermal-güneş fotovoltaik tesisi geliştirdi ve yakın zamanda yoğunlaştırılmış bir termal sistemle genişletmiştir (DiMarzio ve diğ. 2015). 2009 yılında devreye alınan 33 MW jeotermal ikili santrale 26 MW fotovoltaik sistem eklenmiştir. Hedeflerden biri, yaz sıcaklıklarında jeotermal santral çıkış güçlendirmek için fotovoltaik gücü

kullanmaktır. Jeotermal ve fotovoltaik enerji güç çıkışı sıradan bir bahar günü için net ortalama üretim Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Jeotermal ve güneş enerji çıkışı, tipik bir bahar günü için ortalama net güç üretimi (DiMarzio ve diğ. 2015)

## 2.2 Hibrit Güneş-Jeotermal Güç Sistemlerinin Avantajları

Mevcut raporlara ve literatüre göre, güneş ve jeotermal ısı kaynaklarının optimize edilerek birleştirilmesinin birçok faydası vardır. Hibrit güneş-jeotermal sistemlerin avantajları:

- Sıcaklığı veya nispeten düşük maliyetli jeotermal akışkanların buhar kalitesini artırır.
- Arttırılan akışkan sıcaklığıyla jeotermal enerji santrallerinin kullanım verimliliği artar.
- Jeotermal akışkanlar güneş enerjisinin depolanması amacıyla da kullanılabilir.
- Güneş enerjisi ilavesiyle üretilen buhar miktarı artırılarak jeotermal enerji santrallerinin kapasite faktörü arttırılmış olur.
- Enerji kaynaklarını toprağın üstünde ve altında toplamak için arazi kullanımı iyileştirir.
- Güneş enerjisiyle jeotermal akışkan ısıtılarak bazı tuzların katılaşması önlenir, çünkü tuz çözünürlüğü sıcaklıkla artar.
- Uzun vadede operasyon, bakım ve toplam maliyetleri azaltır (Coşkun 2011).

### 2.3 Hibrit Güneş-Jeotermal Güç Sistemlerinin Dezavantajları

Hibrit güneş-jeotermal enerji sistemlerin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Elektrik üretim sistemlerinin karmaşıklığı artar ve bu da bakım zorluğuna neden olabilir.
- Bir enerji santralinin işletimi bazen pratikte karmaşık olan güneş alanından gelen termal enerjinin varlığına göre kütle akış hızının sürekli izlenmesini gerektirir.
- İlk maliyetin yüksek olması, kısa vadede maliyet açısından rekabetçi değildir.
- Hibrit güneş-jeotermal sistemlerinin maliyeti birçok faktöre bağlıdır. Jeotermal alanlardaki düşük işletme basıncı ve düşük sıcaklık, buhar üretmek için büyük bir güneş enerjisi gerektirir, bu da güneş alan boyutunu ve dolayısıyla sermaye yatırımlarını etkiler.
- Jeotermal uygulamalarda, akışkanın kimyasal içeriğine bağlı olarak oluşan kabuklaşma ve korozyon, sistemlerin işletilmesinde karşılaşılan önemli sorunlardandır (Coşkun 2011).

### 3. JEOTERMAL VE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Bu bölümde dünyada, Türkiye’de ve Denizli’de bulunan jeotermal enerji ve güneş enerji potansiyelleri gösterilmiştir. Türkiye’deki bu kaynaklardan güç üreten santraller tablo halinde verilmiştir.

#### 3.1 Jeotermal Enerji Potansiyeli

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısı ve basıncın oluşturduğu sıcaklıkların; bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla çözülmüş mineraller, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su, buhar ve gazlar ile yüzeye taşınan ısı enerjisidir (Coşkun 2011).



**Şekil 3.1:** Jeotermal enerji kaynağı (Url-1 2019)

Jeotermal enerji kaynaklarını başlıca dört sınıfa ayırmak mümkündür:

- Yüksek sıcaklıklı kaynaklar ( $T > 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- Orta sıcaklıklı kaynaklar ( $90 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- Düşük sıcaklıklı kaynaklar ( $T < 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

Jeotermal sahalardan üretilen akışkan, sıcaklık değerlerine göre oldukça geniş bir yelpazede kullanım olanağı sunmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklı sahalardan üretilen akışkan sera, konut, tarımsal kullanımlar gibi ısıtma uygulamasında, yiyecek kurutulması, kerestecilik, kâğıt ve dokuma sanayi, soğutma tesislerinde kullanımlar



olmak üzere endüstriyel uygulamalarda ve borik asit, amonyum bikarbonat, ağır su ve akışkandaki CO<sub>2</sub>'den kuru buz elde edilmesi gibi kimyasal madde üretiminde kullanılmaktadır (Coşkun 2011).

Jeotermal kaynaklar elektrik üretiminde ve endüstriyel ısı işletmelerde ve mekân ısıtması-soğutması gibi projelerde ısı enerji olarak kullanılmaktadır. Çoğu elektrik projelerinde sadece elektrik üretimi gündeme gelirken, bazı projelerden elektrik üretimi ve ayrıca çeşitli ısı uygulamalar için enerji üretimi entegre olarak birlikte yapılmaktadır (Satman 2019).

Dünya'da mevcut toplam jeotermal elektrik kurulu güç kapasitesi Ekim 2018 itibariyle 14.4 GW'a ulaşmış durumdadır. Türkiye, kapasite artışına en yüksek katkı sağlayan ülkelerin arasında yer almaktadır. Türkiye Kasım 2018 itibariyle kurulu gücünü 1347 MW ulaştırmış durumdadır ve bunun hemen hemen tamamı sektörde özelleştirmenin gündeme geldiği son 13 yıl içinde gerçekleşmiştir. Isıl enerji olarak doğrudan kullanım yapan projelerin kurulu gücü 2016 sonu itibariyle 3272 MWt (Megavat saat) olup, halen tahminen 3400 MWt civarındadır (Satman 2019).

Türkiye jeotermal enerjide, potansiyeli itibariyle, şanslı ve zengin sayılabilecek bir ülkedir. Sektörde arama ve sondaj aşamalarından üretim, saha geliştirme ve rezervuar mühendisliğine yönelik geçiş süreci yaşanmaktadır. Uygun yasal altyapı düzeninin oluşturulmasıyla birlikte, gittikçe bilinçlenen ve deneyim kazanan sektör bir öğrenme süreci yaşamaktadır (Satman 2019).

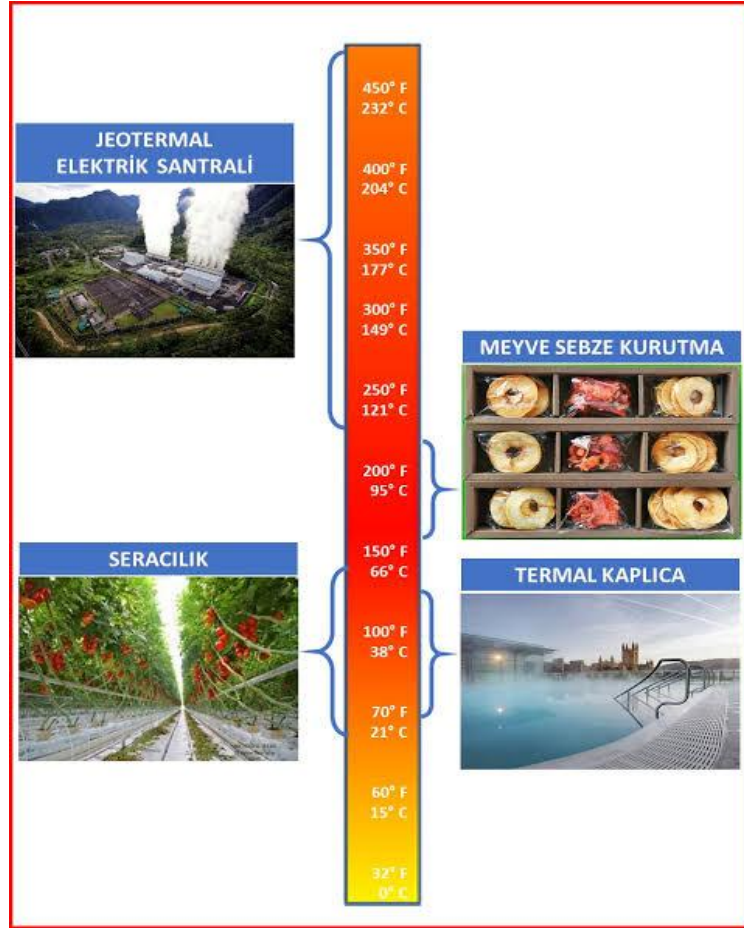
Elektrik üretiminde kullanılan jeotermal sahalarımızın tamamında rezervuar suyu çözülmüş CO<sub>2</sub> (karbondioksit) bulunmaktadır. Suyun CO<sub>2</sub> içeriği termodinamik özellikleri değiştirmektedir (Satman 2019).

Genel değerlendirme yapıldığında gözlemlenen sorunlar: (a) Sahalarda izleme, gözlem ve test eksiklikleri, (b) Deneyimli personel ve uzman eksikliği, (c) Aynı rezervuarı kullanan birden fazla işletmenin yarattığı sorunlar, (d) Enerji yetersizliği (basınç ve sıcaklık düşümü) ve (e) Denetim eksikliği olarak sıralanabilir (Satman 2019).

Jeotermal enerjinin aranması, üretilmesi ve projelerin sürdürülebilir işletiminde sorunlar olması doğaldır, ancak bu yerli, yenilenebilir ve Türkiye'nin



şanslı olarak bolca sahip olduğu enerji kaynağının işletilmesinde ve ilgili sorunların çözümünde sahaları işletenlerin, denetleyici kurumların, üniversitelerin ve jeotermal enerji politikasının ve stratejisinin koordineli çalışması gerekmektedir (Satman 2019). Jeotermal enerjinin kullanım alanları Şekil 3.2’de görüldüğü üzere;



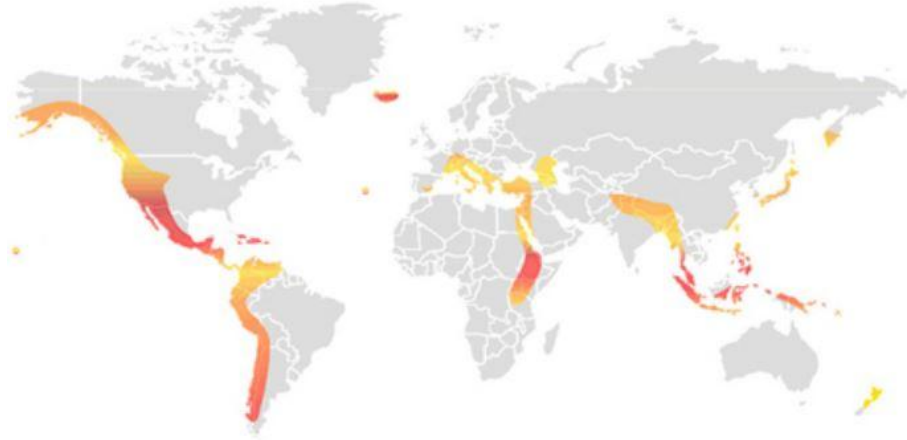
**Şekil 3.2:** Jeotermal enerji kaynağı ve sıcaklığa göre kullanım alanları (Url-2 2019)

- Elektrik üretimi; jeotermal sahalarda açılan kuyulardan üretilen akışkan seperatörlerde buhar ve su olarak ayrıştırıldıktan sonra türbin ve jeneratör ile elektrik enerjisi üretilir.
- Isı üretimi; düşük sıcaklık, basınç ve debideki jeotermal kaynakların sera, organik tarım, ürün kurutma, bölgesel ısı ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla değerlendirilmesidir.
- Termal turizm ve sağlık amaçlı kullanımı; insan sağlığına yararlı mineraller içerebilen düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklı suların sağlık amaçlı kullanımınıdır.

### 3.1.1 Dünyanın Jeotermal Enerji Potansiyeli

Jeotermal enerji, yerkürenin merkezinde bulunan radyoaktif malzemelerin bir akışkanı ısıtmasından kaynaklanan ve yeraltında depolanan termal bir enerji türüdür. Jeotermal rezervuarlarda bulunan enerji, doğrudan ısıtma uygulamaları için veya enerji üretimi amacıyla dolaylı olarak kullanılabilir. Doğrudan kullanıldığında, jeotermal enerji alan ısıtma veya soğutma, tarımsal ürünleri kurutma, yüzme havuzları, seralar ve su ürünleri yetiştiriciliği için kullanılır. Dolaylı bir şekilde kullanıldığında ise kuru buhar, tek flaşlı, çift flaşlı ve ikili çevrimler de dâhil olmak üzere elektrik santralleri tarafından elektrığe dönüştürülür.

Jeotermal enerji, yetmişin üzerinde ülkede ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.3 de dünyadaki bilinen jeotermal bölgeleri gösterilmiştir. Jeotermal enerji santrallerini temsil eden sarı noktaları ve çok sayıda volkanik faaliyet gösteren Avustralya kıtasının üst bölgesi “Ateş Çemberi” olarak adlandırılmaktadır (Li ve diğ. 2016).



**Şekil 3.3:** Jeotermal kaynakların dünya üzerinde dağılımı: kırmızı bölgeler, yüksek enerji yoğunluğuna sahip jeotermal kullanım sıcaklıkları 170-300 °C arasındadır, sarı bölgelerde ise 70-170 °C arasındadır (Zhou ve diğ. 2011).

Üç ana jeotermal rezervuar tipi geleneksel hidrotermal rezervuarlar, sıcak tortul akiferler (HSA) ve HDR'lerdir. Bu jeotermal kaynaklardan yararlanacak güç sistemlerinin seçimi, büyük ölçüde rezervuar özelliklerine bağlıdır. Geleneksel hidrotermal rezervuarlar ve HSA'lar için, kuru buhar, flaşlı ve ikili tesisler çoğunlukla enerji üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, HDR kaynakları

için (çoğunlukla su eksikliği nedeniyle hidrotermal olmayan veya geçirgenlik eksikliği nedeniyle erişilemeyen) daha iyi bir jeotermal sistem (EGS) gereklidir.

Jeotermal enerji, fosil kategorisinde bir enerji kaynağı olmasa da fosil yakıtlar gibi dünya üzerinde homojen bir şekilde dağılmamıştır. Tablo 3.1’de jeotermal enerji kurulu güç listesi verilmiştir. Amerika kıtası, Orta Amerika ülkeleri, Anadolu’da Ege Bölgesi ve Avrupa’da İtalya jeotermal enerji santrallerinin en fazla bulunduğu coğrafyalardır. Ülkelere göre jeotermal enerji santrali kurulu güçlerine bakıldığında ABD açık ara farkla liderliğini korurken ABD’yi, Filipinler, Endonezya ve son dönemlerde birçok yeni JES’in devreye girdiği Türkiye takip etmektedir.

**Tablo 3.1:** Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü listesi (Url-3 2019).

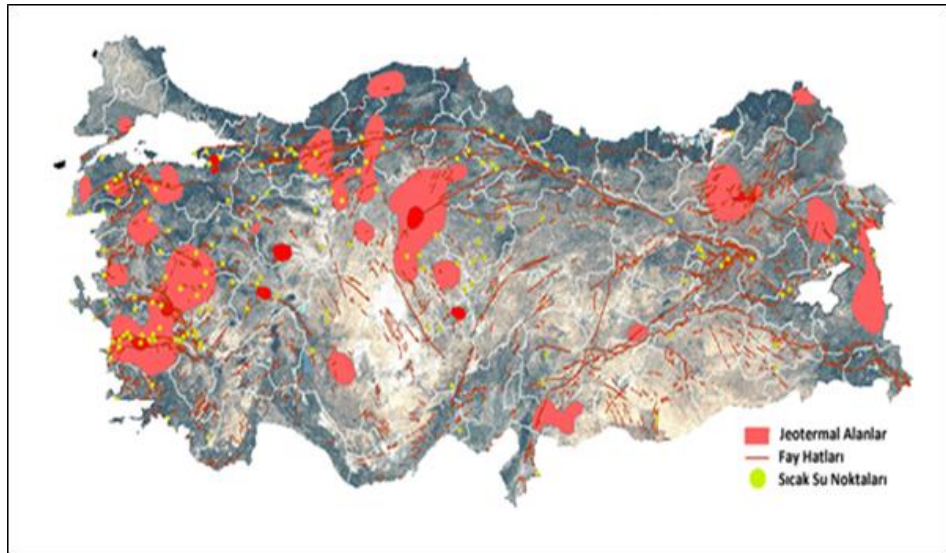
Sıra	Ülke	Güncelleme	Kurulu Güç (MW)
1	Amerika Birleşik Devletleri	Aralık 2018	3.639
2	Endonezya	Aralık 2018	1.948
3	Filipinler	Aralık 2018	1.868
4	Türkiye	Ocak 2019	1.303
5	Yeni Zelanda	Aralık 2018	1.005
6	Meksika	Aralık 2018	951
7	İtalya	Aralık 2018	944
8	İzlanda	Aralık 2018	755
9	Kenya	Aralık 2018	676
10	Japonya	Aralık 2018	542
11	El Salvador	Mart 2016	205
12	Kosta Rika	Mart 2016	204
13	Nikaragua	Mart 2016	109
14	Rusya	Mart 2016	97
15	Papua Yeni Gine	Mart 2016	56
16	Guatemala	Mart 2016	42
17	Almanya	Aralık 2016	38
18	Portekiz	Mart 2016	29
19	Çin	Mart 2016	27
20	Şili	Temmuz 2017	24
21	Etiyopya	Mart 2016	8
22	Avusturya	Aralık 2016	1
	<b>Toplam</b>		<b>14,471 (MW)</b>

Amerika Birleşik Devletleri, Endonezya ve Filipinler'in ardından dünyada en fazla kurulu JES gücüne sahip Türkiye'de devreye giren santraller dışında toplam 701 MW kapasiteli santral projesi de hazırlanmış durumda ve bu 4 ülke jeotermal enerjide 1 GW kurulu güç barajını aşan ülkelerdir. Bu santrallerin 181 MW'ı inşaat aşamasında iken, 104 MW'ı lisans, 396 MW'ı da ön lisans almış durumda. Ayrıca 20 MW'lık bir proje de ön lisans için EPDK'ya başvuru yaptı (Url-3 2019).

### 3.1.2 Türkiye'deki Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları

Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumu itibarı ile aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır.

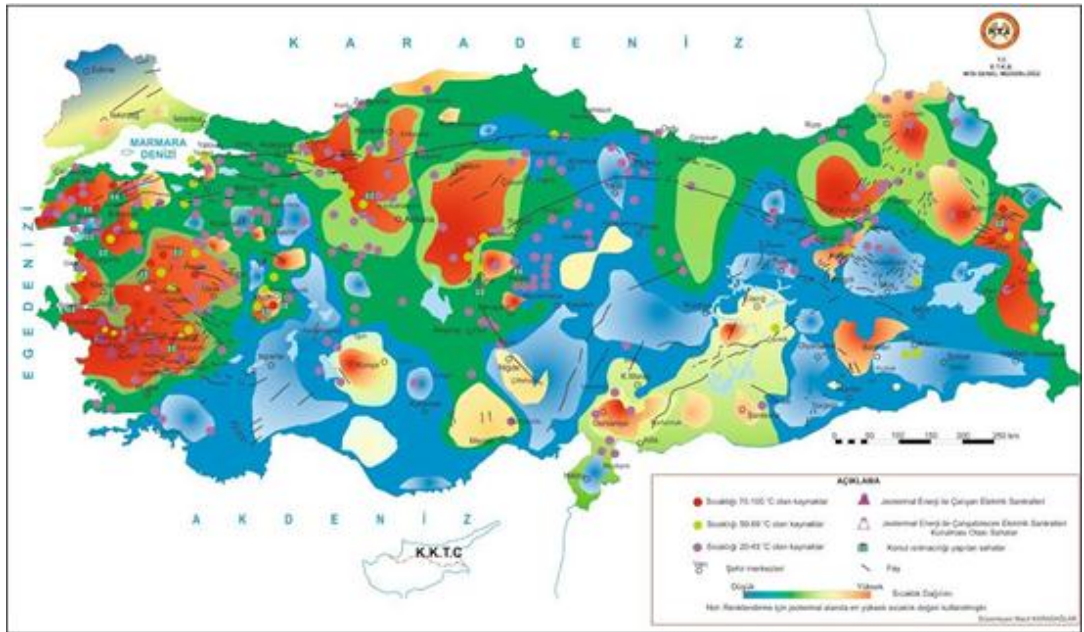
Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa'nın 1. ülkesi ve kurulu güç bakımından ise dünyanın 4. ülkesi konumundadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklindedir (Url-3 2019).



**Şekil 3.4:** Ülkemizdeki potansiyel jeotermal alanların haritası (Url-4 2019)

Ülkemiz jeolojik yapısındaki çeşitlilik dikkate alındığında, jeotermal kaynakların belli yöre ve bölgelerde yer aldığı, jeotermal sistemlerin genç tektonik ve volkanik faaliyetlere bağlı olarak geliştiği görülmektedir. Özellikle Batı Anadolu

Bölgesi'ndeki graben sistemleri ülkemizde yüksek sıcaklığa sahip jeotermal alanlarını barındırmaktadır. Şekil 3.4'te ve Şekil 3.5'te de görüleceği üzere potansiyel jeotermal alanların %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesinde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın %90'ı düşük ve orta sıcaklıklı olup, geri kalan %10'u ise yüksek sıcaklıktadır. Jeotermal enerji uygulamalarında ilk elektrik üretimi 1975 yılında 0,5 MW güce sahip Kızıldere Santrali ile başlatılmıştır (Coşkun 2011).



Şekil 3.5: Türkiye'deki jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası (Ur1-4 2019)

Jeotermal enerji arama çalışmalarına hız verilmiş ve sondajlı jeotermal enerji aramaları 2,000 m seviyelerinden 28,000 m seviyelerine çıkarılmıştır. 2005 yılından itibaren, mevcut kaynakların geliştirilmesi ve yeni kaynak alanlarının aranması çalışmalarına ağırlık verilmiştir. 2004 sonu itibarı ile 3,100 MWt olan kullanılabilir ısı kapasitesi, 2008 yılında, Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu'nun yürürlüğe girmesi ve özel sektörün de jeotermal arama, geliştirme ve yatırım çalışmaları ile ülkemizin toplam jeotermal ısı kapasitesi (görünür ısı miktarı) 35,500 MWt'e ulaşmıştır (Cebeci 2017).

### 3.1.3 Türkiye'deki Jeotermal Güç Santralleri

2017 yılı sonunda 1064 MW olan Türkiye jeotermal enerji santrali kurulu gücü 2018 yılı içerisinde devreye alınan 219 MW kapasite ile 1283 MW ulaştı. Denizli'de devrede olan jeotermal enerji santrallerinin toplam gücü 317,7 MW'tır (Url-5 2019).

**Tablo 3.2:** Türkiye'de devrede olan jeotermal enerjili güç santralleri (Url-5 2019)

Sıra	Santral Adı	İl	Firma	Kurulu Güç
1	Kızıldere-3 JES	Denizli	Zorlu Enerji	165 MW
2	Efeler Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Güriş Holding	115 MW
3	Kızıldere-2 Jeotermal Enerji Santrali	Denizli	Zorlu Enerji	80 MW
4	Pamukören Jeotermal Santrali	Aydın	Çelikler Enerji	68 MW
5	Galip Hoca Germencik JES	Aydın	Güriş Holding	47 MW
6	Alaşehir Jeotermal Enerji Santrali	Manisa	Zorlu Enerji	45 MW
7	Maren Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Kipaş Holding Enerji Grubu	44 MW
8	Dora 3 Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	MB Holding	34 MW
9	Melih Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Kipaş Holding Enerji Grubu	33 MW
10	Greeneco 3 Jeotermal Santrali	Denizli	Greeneco Enerji	26 MW
11	Greeneco Jeotermal Enerji Santrali	Denizli	Greeneco Enerji	26 MW
12	Efe 7 Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Güriş Holding	25 MW
13	Enerjeo Kemaliye Santrali	Manisa	Enerjeo Kemaliye Enerji	25 MW
14	Ken 3 JES	Aydın	Kipaş Holding	25 MW
15	Mehmethan Jeotermal Santrali	Aydın	Kipaş Holding	25 MW
16	Deniz Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Kipaş Holding Enerji Grubu	24 MW
17	Ken Kipaş Jeotermal Santrali	Aydın	Kipaş Holding	24 MW
18	Kerem JES	Aydın	Kipaş Holding Enerji Grubu	24 MW
19	Kubilay Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Çevik Grup	24 MW
20	Türkerler Alaşehir 2 JES	Manisa	Türkerler Holding	24 MW
21	Türkerler Alaşehir JES	Manisa	Türkerler Holding	24 MW
22	Özmen 1 Jeotermal Enerji Santrali	Manisa	Özmen Holding, Sis Enerji	24 MW
23	Türkerler Jeotermal Enerji Santrali- 3	Manisa	Türkerler Holding	23 MW
24	Efe 6 JES	Aydın	Güriş Holding	23 MW
25	Pamukören 2 Jeotermal Enerji Santrali	Aydın	Çelikler Enerji	23 MW
26	Pamukören 3 JES	Aydın	Çelikler Enerji	23 MW
27	Sultanhisar 2 JES	Aydın	Çelikler Enerji	23 MW

Ülkemizde jeotermal arama yapan ilk kuruluş olan MTA Genel Müdürlüğü, sahip olduğu bilgi birikimi ve deneyimle yürütülen çalışmalar sonucu ortaya koyduğu jeotermal potansiyele, özellikle 1990'lı yıllardan sonra özel teşebbüs ve belediyeler ilgilerini artırmıştır. Bu doğrultuda MTA Genel Müdürlüğü potansiyel belirleme çalışmalarını hızlandırmış, aynı zamanda kaynakların verimli kullanımına yönelik fizibilite çalışmalarına taban oluşturan veri desteğini sağlamıştır. Jeotermal kaynaklara yönelik arama ve geliştirme sürecinin tamamında etkin olan MTA Genel Müdürlüğünün yanı sıra İller Bankası, TPAO, Belediyeler, Özel İdareler ve son zamanlarda özel teşebbüsün yaptığı çalışmaların sonucu olarak günümüzde Türkiye'nin jeotermal potansiyeli teorik olarak 31,500 MWt enerjiye sahiptir (Cebeci 2017).

### 3.1.4 Denizli'de Bulunan Jeotermal Kuyuların Termodinamik Özellikleri

**Tablo 3.3:** Denizli-Kızıldere jeotermal bölgesine ait kuyuların özellikleri (Akkuş 2005)

Kuyu No	Yıl	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)
<b>KD-1</b>	1968	540	203
<b>KD-1/A</b>	1968	451	198
<b>KD-2</b>	1968	705	175
<b>KD-3</b>	1969	370	155
<b>KD-4</b>	1969	368	166
<b>KD-111</b>	1969	505	164
<b>KD-6</b>	1970	851	196
<b>KD-9</b>	1970	1241	170
<b>KD-8</b>	1970	576	193
<b>KD-12</b>	1970	405	160
<b>KD-7</b>	1970	645	204
<b>KD-14</b>	1970	597	208
<b>KD-13</b>	1971	760	196
<b>KD-15</b>	1971	510	208
<b>KD-16</b>	1973	667	207
<b>KD-17</b>	1975	350	157
<b>KD-22</b>	1985	888	204
<b>KD-21</b>	1985	898	205
<b>KD-20</b>	1986	810	204
<b>KD-R1</b>	1998	2261	240.6
<b>KD-R2</b>	1999	1428	204

Denizli-Kızıldere jeotermal sahası, Denizli'nin 35 km batısında, Büyük Menderes nehrinin yanındadır. Kızıldere jeotermal alanı Ege Graben sistemleri içinde yer almaktadır. Bölgede 1968 yılından itibaren çok sayıda sondaj yapılmıştır (Akkuş 2005).

Bölgede 9 adet üretim kuyusu ile 2 adet reenjeksiyon kuyusu bulunmaktadır. Reenjeksiyon kuyularından bir tanesi, sıcaklık ve basıncının yüksek olmasından dolayı üretim kuyusuna dönüştürülmüştür (Öztürk ve diğ. 2006). Bölgeye ait kuyuların karakteristik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

1974 yılında bölgeye kurulan Kızıldere jeotermal güç santrali, 0,5 MW güç ile test üretimine başlamış olup, 1984 yılında santralin kurulu kapasitesi 20,4 MW'a çıkarılmıştır (Serpen, 2000). Kuyulardan çıkarılan jeotermal akışkan sıvı fazındadır. Toplam kütleli debi, 282,84 kg/s'dir. Kuyubaşı sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 193 °C'den 240 °C'ye ve 1,033 MPa'dan 3,337 MPa'a değişmektedir (Öztürk ve diğ. 2006).

Sahanın en önemli problemi, çıkarılan jeotermal akışkanın yüksek kimyasal parçacık ve yoğuşmayan gaz içeriğine sahip olmasıdır. Jeotermal akışkanda toplam çözünmüş parçacık miktarı 2500-3200 ppm arasında ve yoğuşmayan gaz konsantrasyonu da ağırlıkça %10-21 aralığındadır. Yoğuşmayan gazların büyük bir kısmı (%96-99) CO<sub>2</sub>'dir (Öztürk ve diğ. 2004). CO<sub>2</sub> gibi gazların suda çözünmesi; buhar ile temas eden üniteler ve borularda korozyona neden olmaktadır. Bu nedenle, santral yıllardan beri tam kapasiteye yakın kapasitelerde çalıştırılamamıştır. Çünkü kabuklaşma problemi tam anlamıyla giderilememiştir (Öztürk ve diğ. 2006).

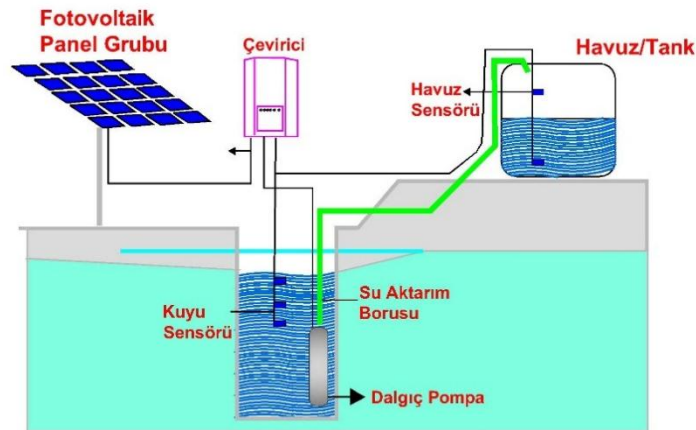
### **3.2 Güneş Enerjisi Potansiyeli**

İnsanlar eski zamanlardan beri güneşin gücünü kullanmıştır. Sürdürülebilir, tehlikeli atık oluşturmayan, düşük işletme maliyetli, enerji transferi sorunu az olan ve ekonomik sorunlardan etkilenmemek gibi avantajları nedeniyle güneş enerjisi tercih edilmiştir. Kullanım alanları şunlardır: Gıda kurutma ve seralarda ısıtma, su arıtma ve tuzdan arındırma, güneş fırını, sıcak su temini, ısıtma ve soğutma, güneş pompası, aktif ve pasif sistemler ve elektrik üretimi.



Bilinen ilk güneş enerjisi uygulaması yiyeceklerin kurutulması üzerineydi. Güneş enerjili kurutucular tarım endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Bu işlemin amacı yiyeceğin nemini almak ve yiyecekleri uzun süre biriktirmektir. Güneş enerjisi için bir diğer uygulama alanı tarımsal sanayideki seralardır. Sera ısıtması güneşten aktif veya pasif yöntemlerle faydalanmaktadır. Çatının konumu ve çatı eğimi pasif yöntemlerde önemli faktörlerdir. Aktif yöntemlerde güneş enerjisinden yararlanmak için güneş panelleri kullanılır. Su kıtlığı ise insanlık için ciddi bir problemdir. Güneş enerjisi ile tuzdan arındırma, uzun süredir bir uygulama olarak kullanılmaktadır. Denizden tatlı su üretimi, yüksek işletme maliyeti, hava kirliliği, pahalı ve hassas cihazların kullanılması nedeniyle tercih edilmez. Arap simyacılar güneş damıtma için cilalı Şam aynaları kullanmışlardır.

Fransa'da Belidor (1725) güneş enerjisiyle çalışan bir pompa geliştirdi. Güneş enerjili bir pompa, paneller tarafından üretilen elektrikle veya toplanan güneş ışığından elde edilen yayılan termal enerji ile çalışır. Kaynaklardan (yeraltı, göl veya nehir) su çekmek ve daha sonra güneş enerjisi kullanarak pompalamak mümkündür. Güneş enerjili pompalar daha ekonomik, daha düşük işletme ve bakım maliyetlidir ve diğer pompalardan daha az çevresel etkiye sahiptirler (Kalagirou 2009). Şekil 3.6'da güneş enerjili bir pompanın çalışması verilmiştir.

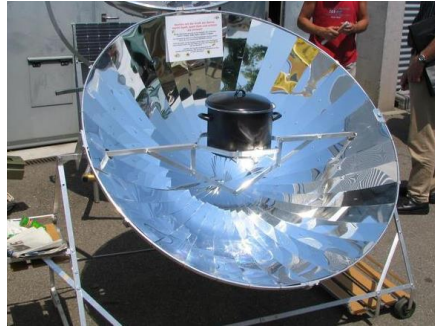


**Şekil 3.6:** Güneş enerjili pompanın çalışması

Güneş fırını, Çin ve Hindistan gibi bazı ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş fırınlarının içleri yansıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. Yemek toplanan ısı ile pişirilir. Şekil 3.7, bir güneş fırını örneğini göstermektedir. Güneş sistemlerinin diğer uygulamaları şunlardır: Aktif ve pasif güneş sistemleri. Aktif sistemde, güneş enerjisi, su ve mekân ısıtması veya endüstriyel kullanım için

kolektörler tarafından toplanır. Isı, güneş kolektörleri tarafından çalışma akışkanına aktarılır. Aktif sistemde, ısıyı uzaya aktarmak için başka bir çalışma akışkanı veya ısı aktarma mekanizması gerekir (Çakıcı 2016). Isıyı pasif sistemde taşımak için çalışan bir akışkan yoktur. Bir binanın temel ihtiyacı (örneğin ısıtma, soğutma ve aydınlatma) pasif sistem tarafından karşılanır. Pasif sistemler dört ana gruba ayrılır: Doğrudan enerji kazanım sistemi, dolaylı enerji kazanım sistemi, şofben-duvar sistemi ve izole kazanç sistemi (Çakıcı 2016).

Doğrudan enerji kazancı sisteminde, maksimum güneş ışığı güneşe bakan pencerelerle sağlanmaktadır. Güneş ışını, zemin ve duvar tarafından emilir. Dolaylı enerji kazancı sisteminde, ısı daha sonra termal kütle tarafından depolanır; depolanan ısı iletim, radyasyon veya konveksiyon ile taşınır. Yaygın olarak bilinen sistem Trombe duvarıdır. Güney duvarın önüne bir pencere yerleştirilir. Termal kütle cam tarafı daha iyi güneş radyasyonu emilimi için siyahla boyanır (Çakıcı 2016).



Şekil 3.7: Güneş fırını (Çakıcı 2016).

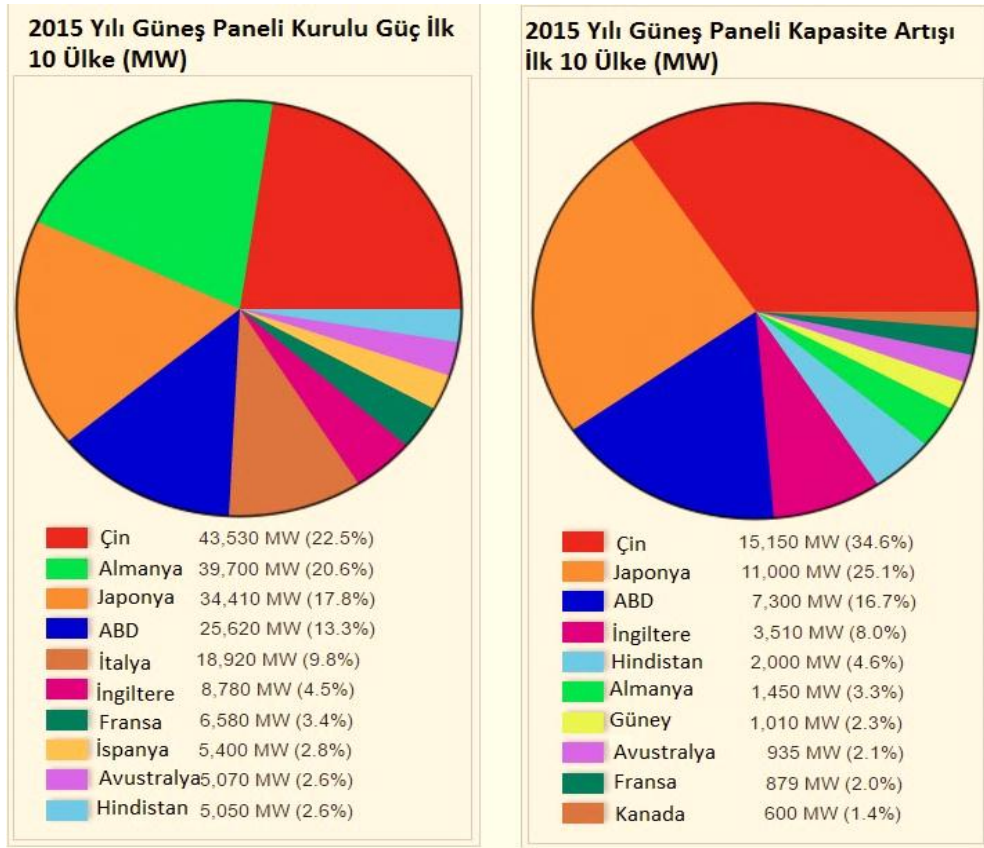
### 3.2.1 Dünyada Güneş Enerjisi Potansiyeli

Dünya güneş enerjisine baktığımızda en başta ABD bulunmakta ve devamında Avrupa ülkeleriyle Çin yer almaktadır. Bazı ülkeler maruz kaldığı güneş ışınları potansiyeli bakımından öne çıkarken bazı ülkelerde sahip oldukları teknoloji sayesinde öne çıkmaktadır.

2014 yılında Kuzey Amerika'da, ABD'nin güneş elektriği kurulu gücü 7 GW'a yakın artış sağlamış ve 20 GW düzeyine ulaşmıştır. Bu rakamın büyük çoğunluğunu fotovoltaik alandaki kurulu güçten sağlamıştır. Küçük kısmında yoğunlaştırılmış güneş enerjisi kurulu gücü etkili olmuştur. 2015 yılının ilk 10

ayında, güneş enerjisi kurulu gücü 4,1 GW artış göstermiştir. Bununla birlikte toplam güneş enerjisi kurulu gücü 24,1 GW olmuştur. Bu yatırımların neticesinde 5 milyon evin elektriğini karşılayacak seviyeye ulaşmıştır (Cebeci 2017).

Çin, Dünya'nın en büyük solar enerji marketi konumunda olup 2015 yılının ilk 9 ayında 2014 yılındaki güç artışını yakalamıştır. Büyük ölçekli güneş elektriği bu alandaki artışın sebebi olmuştur. 2015 yılının ilk 6 ayında 10 enerji santrali faaliyeti geçirmiş olan Çin, bu süre zarfında güneş elektriği kapasitesi 37,95 GW olmuştur (Pelissier 2015). Japonya her ne kadar kapasite artışında ikinci sırada yer almış olmada temiz enerji üretiminde çoğunluğu hidroelektrik enerjisine vermiştir.



**Şekil 3.8:** 2015 yılı güneş enerjisi kapasite artışı ve kurulu güç bakımından ilk on ülke (Url-6 2017)

Hindistan'da 2016 yılı mayıs sonu itibariyle devrede olan güneş elektriği sistemlerinin toplam gücü 4,010.6 MW'tır. Ülkenin geliştirmiş olduğu projeler bu gücün 1,353.5 MW'lık bölümünü oluşturmaktadır (Cebeci 2017).

### 3.2.2 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Potansiyeli

Fosil kaynakların sınırlı rezervleri, fiyatlarındaki dalgalanmalar ve çevreye verdiği zararlar, ülkelerin birincil enerji kaynaklarına alternatifler aramasına neden olmuştur. Sınırsız ve çevreyle dost bir kaynak olan güneş enerjisi klasik enerji kaynaklarına karşı güçlü bir alternatiftir. Enerjide ithal fosil yakıtlı kaynaklara bağımlılığı yüksek olan Türkiye, güneş enerjisi potansiyelini elektrik üretimi amacıyla değerlendirmeyi planlamaktadır (Cebeci 2017).

Çalışmanın temel amacı, Türkiye'de uygulanan tarife garantili fiyat (FIT) teşvik mekanizmasının güneş enerjisi yatırımları için yeterliliğini araştırmak hem yatırımcıya hem de karar alıcılara yol göstermektir. Ayrıca güneş enerjisinden elektrik üretiminin uzun vadede fayda ve maliyetlerini değerlendirmek, bu kaynağın ülke ekonomisine azami düzeyde fayda sağlaması için önerilerde bulunmak da çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır (Cebeci 2017).

Sayılan amaçlar doğrultusunda çalışmada, dünyada güneş enerjisini teşvik politikaları ele alınmış, güneş enerjisi piyasasının gelişimiyle beraber seçilmiş ülke örneklerinde uygulanan politikalar incelenmiştir. Ardından, Türkiye'de güneş enerjisinden elektrik üretimine yönelik mevzuatın gelişimi ve güneş enerjisi sektörünün mevcut durumu ortaya konulmuştur (Cebeci 2017).

Çalışmanın analiz kısmında, örnek bir güneş enerjisi santralının finansal analizi yapılmıştır. Analiz sonunda Türkiye'de güneş enerjisi yatırımlarının kârlı ve kamunun yatırımlara uyguladığı desteğin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, güneş enerjisi imalat sanayiinin gelişmesi için uygulanan desteğin yatırımcıları yerli panellere yönlendirecek ölçüde güçlü olmadığı anlaşılmıştır (Cebeci 2017).

Analizler yapılırken 2015-2030 yılları arasında güneş enerjisi yatırımlarının ekonomide yaratacağı fayda ve maliyetler değerlendirilmiştir. Güneş enerjisi kurulu gücünün 2030 yılında 8,500 MW ile 21,369 MW arasında değişebileceği, söz konusu yıllar arasında güneş enerjisi santrallerinin doğal gaz yakıtlı santralleri ikame edeceği varsayılarak yapılan analizde, farklı doğal gaz fiyat yaklaşımları altında doğal gaz ithalatında 5 ile 26,6 milyar \$ (dolar) tutarında azalma olacağı tahmin edilmiştir.

Güneş enerjisi santrallerinin yerli imalatı geliştirilmediği sürece söz konusu enerji kaynağının enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında beklenen etkiyi göstermeyeceği ortaya çıkmıştır (Cebeci 2017).

### 3.2.3 Türkiye’deki Güneş Enerjili Güç Santralleri

Türkiye’de güneş enerjisi santrali kurulu gücü bakımından ilk sırada 50 MW değerinde Kayseri OSB Güneş Enerjisi Santrali yer almaktadır (Url-7 2019).

Türkiye’de bulunan güneş enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 1363 MW’dır. 2016 yılındaki verilere göre güneş enerji santralleri ile 1.020.000.000 kilovatsaat elektrik üretimi yapılmıştır (Url-7 2019).

**Tablo 3.4:** Türkiye’de kurulu gücü en yüksek güneş santralleri (Url-7 2019)

Sıra	Santral Adı	İl	Firma	Kurulu Güç
1	Kayseri OSB Güneş Enerjisi Santrali	Kayseri	Kayseri OSB	50 MW
2	Özkoyuncu Madencilik Balıkesir GES	Balıkesir	Özkoyuncu Madencilik	40 MW
3	Konya Karatay Kızören GES	Konya	Tekno Enerji	18 MW
4	Derinkuyu Güneş Enerjisi Santrali	Nevşehir	-	17 MW
5	Elâzığ Kovancılar Güneş Enerji Santrali	Elâzığ	-	15 MW
6	Makascı Mühendislik GES	Konya	Makascı Mühendislik	10 MW
7	Renoe Acıpayam GES	Denizli	Erikoğlu Holding	10 MW
8	Tekno Ray Solar Cihanbeyli Güneş Enerji Santrali	Konya	Tekno Enerji	10 MW
9	Yaysun Güneş Enerjisi	Konya	Akfen Enerji	9,98 MW
10	MT Güneş Enerjisi Santrali	Konya	Akfen Enerji	9,98 MW

### 3.2.4 Denizli’de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Enerji Piyasası Kurumu başta olmak üzere enerji yönetiminin lisanssız güneş enerji santrallerine yönelik yeni yaklaşımı, bu alanda eldeki proje stokunun hayata geçirilmesi çalışmalarını hızlandırıyor. Lisanssız santrallerden alınan sistem kullanım bedellerinin 2018’den itibaren devreye girecek tesislerde bugünkünün yaklaşık beş katı düzeyinde uygulanacağını kararlaştırılması, bu alandaki yatırımcıların elini çabuk tutmasını zorunlu kılıyor (Url-8 2019).

Güneş santrali yatırımları alanında Konya, Niğde ve Kayseri gibi Orta Anadolu illerinden sonra en çok öne çıkan illerden biri de Denizli. Denizli’deki lisanssız Güneş Enerji Santrali (GES) projelerinin hayata geçirilmesi çalışmaları da hızlanmış durumda. Ulusal ölçekte tanınmış iki önemli enerji oyuncusu ile bir yerel oyuncu da bu çalışmaları yürütenler arasındadır (Url-8 2019).

Türkiye’nin elektrik üretim, dağıtım ve ticareti alanlarıyla enerji ekipmanları üretimi alanındaki önde gelen oyuncularından Denizli merkezli Bereket Enerji Grubu, güneşe dayalı elektrik üretimine de odaklandı. Grup, Denizli merkeze bağlı Çeltikçi bölgesinde 350 dönümlük atıl bir arazi üzerinde her biri birer MW’lik 14 adet lisanssız güneş enerji santrali kuruyor (Url-8 2019).

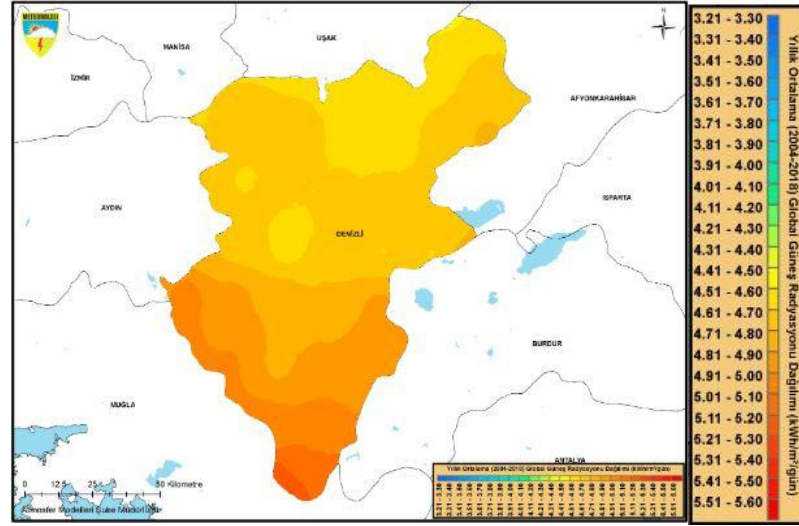
Bereket Enerji Grubu, Denizli Çeltikçi’deki lisanssız GES projelerinin kurulumu için EPC firması Prime Enerji ile anlaşmaya varıldı. Denizli girişinde, tarıma uygun olmayan sahanın santral kurulumu için tasfiye edilmesi çalışmaları bitmek üzeredir. Santralde 52 bin adet 265-275 W’lık panel kullanılacak. Parla markalı paneller, Bereket Enerji Grubu’nun Denizli Organize Sanayi Bölgesi’ndeki kendi fabrikasında üretiliyor (Url-8 2019).

Rüzgâr ve güneşe dayalı elektrik üretim projelerine odaklanan Fina Enerji de Denizli’deki güneş santrali yatırımcılarından bir diğeri. Grup halen Denizli Çardak, Kocadere, Acıpayam, Kocabaş ilçelerinde 11 MW’lik kurulu güce sahip lisanssız GES’leri devreye almış durumda. Fina Enerji il genelinde 16 MW’lik lisanssız GES’i daha yıl sonuna kadar şebekeye bağlamak için çalışmaları hızlandırdı. Kurulum

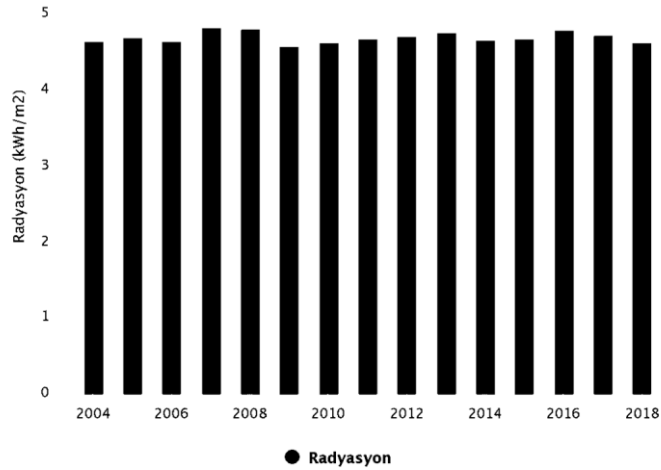
çalışmaları devam eden lisanssız GES'ler ise Kocabaş ve Kocadere ilçelerinde yer alacak (Url-8 2019).

Denizli'de GES yatırımları için çalışan bir diğer oyuncu ise Erikoğlu Grubu. Denizli merkezli Erikoğlu Grubu, bugüne kadar çok sayıda lisanssız GES projesi geliştirmenin yanında 10 MW'lık lisanslı bir projenin de sahibi. Erikoğlu Grubu, 10 MW'lık lisanslı GES'i Acıpayam ilçesinde hayata geçirmeye hazırlanıyor (Url-8 2019).

Denizli 37° 78' Kuzey enleminde ve 29° 09' Doğu boylamında bulunur. Meteoroloji istasyonunda yapılan ölçümlere göre Denizli yılda ortalama 2,931 saat güneşlenir ve ortalama 1,591 kWh/m<sup>2</sup>-yıl güneş ışınımı vardır (Url-9 2019) .



Şekil 3.9: Denizli'ye ait güneş ışınımı meteoroloji verileri 2004-2016 yılları (Url-9 2019)



Şekil 3.10: Denizli yıllık ortalama radyasyon değerleri (Url-9 2019)

## 4. İLGİLİ ISIL GÜÇ ÇEVİRİMLERİ

### 4.1 Jeotermal Enerjili Güç Çevrimleri

Türkiye’de kurulu güç santrali sayısı 64’tür. Kurulu jeotermal santrallerin türleri Tablo 4.1’de verilmektedir. Hava soğutmalı santraller (52 adet), yaz aylarındaki düşük üretimleri nedeniyle sadece hava sıcaklığına bağlı olarak, %40’a ulaşan üretim kayıplarına neden olmaktadır. Su soğutmalı 12 santral vardır. Son kurulan hava soğutmalı binary JES’lerde üretici firmaların hava tasarım sıcaklığının altındaki değerler için santralleri %8 fazla üretimle sınırladığı görülmektedir (Aksoy 2019).

Firmalar bu sınırlama nedenini net olarak açıklamamakla birlikte, daha küçük jeneratör ve türbin seçmek, daha düşük kapasiteli ısı değiştirici ve kondenser yaparak maliyetlerini düşürmek olduğu sanılmaktadır (Aksoy 2019).

**Tablo 4.1 :** Türkiye’de kurulu jeotermal santral türleri (Aksoy 2019)

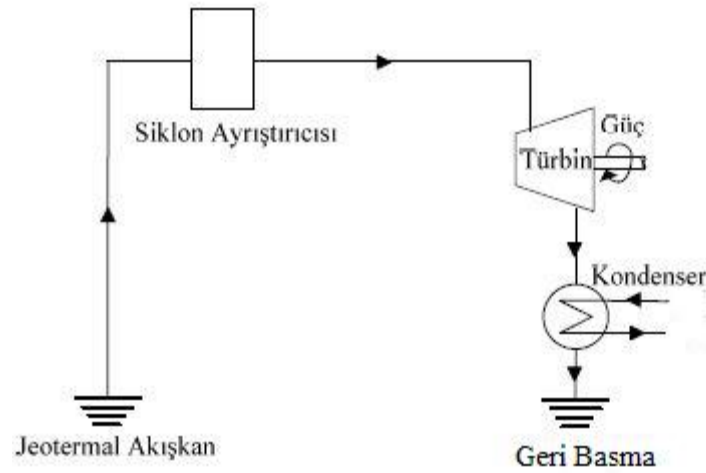
Santral türü	Santral sayısı
Tek buharlaştırmalı (tek flaşlı)	1
Çift buharlaştırmalı (çift flaşlı)	2
Bileşik Çevrim (kombine çevrim)	3
Çift Akışkanlı Çevrim (Binary)	58

#### 4.1.1 Doğrudan Buhar Çevrimi (Kuru Buhar)

Kuru buhar kullanan çevrimler en basit ve dolayısıyla en ekonomik çevrimlerdir. Bu çevrimde, jeotermal kuyudan çıkarılmış buhar fazındaki jeotermal akışkan filtreden geçirilerek direk olarak türbine gönderilir ve elektrik enerjisi elde edilir (Kaymakçıoğlu ve Çirkin 2005). Yoğuşturuculu ve yoğuşturucusuz kuru buharlı sistemler geçmişte ve günümüzde kullanılmaktadır. Yoğuşturucusuz



çevrimde sistem bileşenlerinin az olması ekonomik açıdan avantaj sağlamasına rağmen buharın atmosfere atılması çevre kirliliği açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Türbin çıkışının atmosfere açık olması sebebi ile çevre koşullarından fazlasıyla etkilenmektedir. Örneğin rakımı yüksek olan bölgelerin atmosfer basıncı düşük olacak, bu da türbin çıkış basıncını düşürerek aynı buhar kalitesinde daha fazla elektrik üretimi yapılmasını sağlayacaktır. Yoğuşturuculu buhar çevriminde türbin çıkışında yoğuşturucu bulunur ve atmosfer koşulundan farklı olarak türbin çıkışında vakum ortamı yaratılmış ve daha fazla güç üretilmiş olur. Ayrıca bu çevrimde buhar yoğuşturularak reenjeksiyon yapılmasına olanak verir (Kanoğlu 2005).



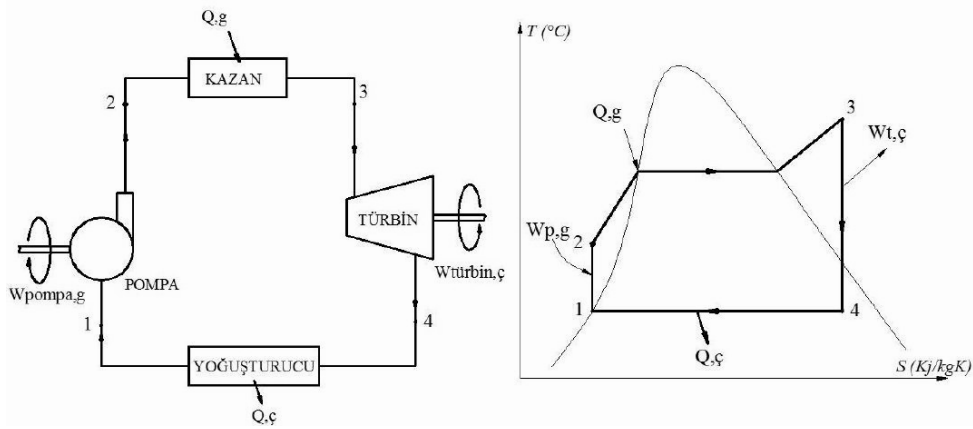
**Şekil 4.1:** Kuru buhar çevrim şeması

Doğrudan buhar santrallerinin sermaye maliyeti yaklaşık 2200 \$/kW'dır (Saha geliştirme çalışmaları ve ekipmanlar dâhil). İtalya-Larderello'da bulunan Valle Secolo jeotermal güç santrali bir doğrudan buhar santralidir. Burada, 204 °C sıcaklığındaki ve 111,1 kg/s debideki buhar kullanılarak 52,2 MW güç üretilmektedir (Braun ve McCluer 1993).

#### 4.1.2 İdeal Rankine Çevrimi

Temeldeki İdeal Rankine çevrimine bakıldığında; Rankine çevrimi 4 ana elemandan oluşur. Bunlar, pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucudur. Burada su, pompaya 1 noktasında doymuş sıvı olarak girer ve izentropik bir hal değişimiyle kazan basıncına sıkıştırılır. Su sıcaklığı, izentropik sıkıştırma işlemi sırasında suyun

özgül hacminin biraz azalmasından dolayı bir miktar artar. Su sıkıştırma işleminin ardından kazana 2 noktasında sıkıştırılmış akışkan olarak girer ve 3 halinde kızgın buhar olarak çıkar. Kazan temelde büyük bir ısı değiştiricisidir. Yanma sonucunda oluşan gazlardan, nükleer reaktörden veya diğer kaynaklardan sağlanan ısı burada hemen hemen sabit basınçta, suya gezer. 3 noktasındaki kızgın buhar, türbinde izentropik olarak genişler ve bir mili döndürerek iş yapar. Bu dönen mil genellikle elektrik üretimi için bir jeneratöre bağlanmıştır. Bu genişleme sırasında buharın sıcaklığı ve basıncı düşer. Buhar, türbinden çıktıktan sonar 4 noktasında yoğuşturucuya girer. Bu esnada buhar, doymuş sıvı-buhar karışımı halindedir. Su, 1 noktasından doymuş sıvı halinde çıkar ve tekrar pompaya girerek döngüsünü tamamlar (Cengel ve Boles 2008) Şekil 4.5'te ideal Rankine çevrimine ait sistem ve T-S diyagramı görölmektedir.



**Şekil 4.2:** İdeal Rankine çevrimi ve T-S diyagramı (Ergün 2014).

- (1-2) Pompayla izentropik sıkıştırma
- (2-3) Kazanda, sisteme sabit basınçta ( $P=\text{sabit}$ ) ısı geçişi
- (3-4) Türbinde izentropik genişleme
- (4-1) Yoğuştucuda, sistemden sabit basınçta ( $P=\text{sabit}$ ) ısı aktarılması.

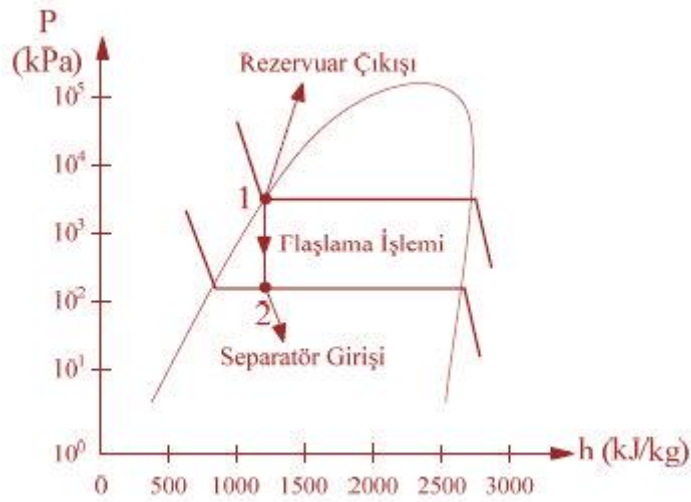
#### 4.1.3 Flaşlı Çevrimler

Dünyadaki kaynakların büyük bir kısmının sıvı ağırlıklı ya da sıcak su kaynağı olması (yaklaşık %90), elektrik üretimi için gereken yeterli buharın farklı yöntemler ile elde edilmesi zorunluluğunu doğurmuştur. Bu yöntemlerden birisi jeotermal akışkanın flaşlanması işlemidir. Akışkan yeraltında yüksek basınçta

bulunur. Kuyu başına ulaştığında ise basıncı bir miktar düşer. Jeotermal akışkan, eğer bir kısılma vanası kullanılarak daha düşük basınçlara kısılrsa, yüksek basınçlı sıvı ağırlıklı akışkan, düşük basınçlı fakat daha çok buhar içeren akışkana dönüşecektir. Bu işleme “flaşlama işlemi” denir. Şekil 4.3’te suyun flaşlanmasına ait basınç-entalpi diyagramı görülmektedir (Coşkun 2011).

Flaşlama işleminde entalpi değişmemektedir. Flaşlama basıncı azaldıkça seperatörden ayrılan buhar miktarı artmakta, buharın entalpisi azalmaktadır. Basınç arttıkça buhar miktarı azalmakta, buharın entalpisi artmaktadır. Bu yüzden flaşlama basıncının seçimi oldukça önemlidir. Optimum flaşlama basıncının değeri santralin net gücünü maksimum yapan değerdir. Optimum basınçta ısı verim %5,36 iken, ekserji verimi %29,91 olmaktadır (bkz. Şekil 4.3).

Flaşlama işlemi bir sabit entalpi işlemidir. İşlem sonucunda genellikle kuruluk derecesi 0,10-0,50 arasında buhar elde edilir. Buharın kuruluk derecesini etkileyen faktörler; rezervuardaki akışkanın termofiziksel şartları, kuyunun boyutları ve kuyu başı basıncıdır (Coşkun 2011).



**Şekil 4.3:** Flaşlama işlemine ait basınç-entalpi diyagramı (Coşkun 2011)

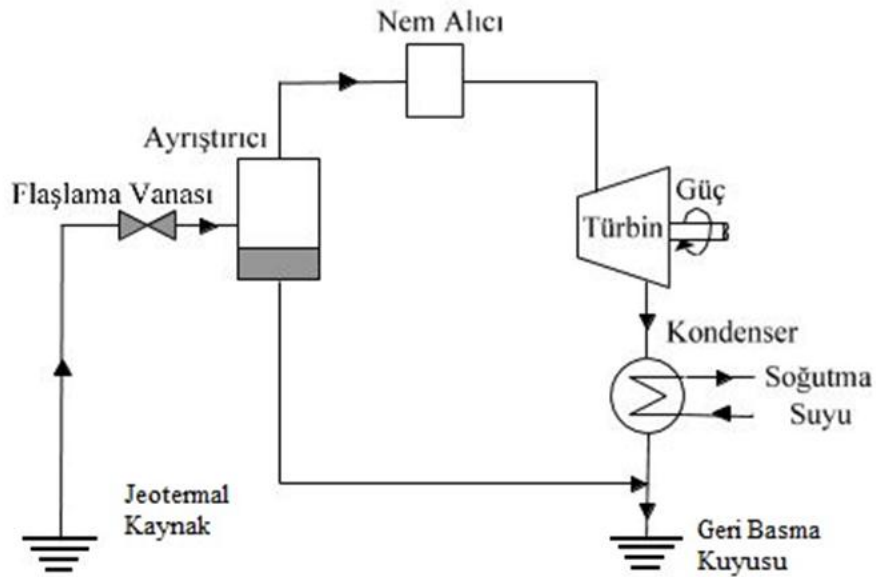
Flaşlı buhar çevrimleri “tek flaşlı çevrim” ve “çift flaşlı çevrim” olarak iki kısımda incelenebilir. Bir kaynaktan hangi tip flaşlı çevrimin kullanılacağını belirten parametreler: kaynak karakteristikleri, güç santralının kapasitesi, termodinamik/ekonomik en uygun şekle sokma analizleri, donanım kullanılabilirliğidir.

Flaşlı santrallerinin sermaye maliyetleri saha geliştirme ekipmanlar dâhil 1700 ile 2100 \$/kW arasında değişmektedir. Flaşlı santrallerinin kullanılabilirlik faktörleri ve kapasite faktörleri yüksektir. Bu değerler sırasıyla %95,1-99,8 ve %95-100 arasında değişmektedir (Braun and McCluer, 1993).

#### 4.1.3.1 Tek Flaşlı Çevrim (tek püskürtmeli)

Tek flaşlı (tek püskürtmeli) jeotermal elektrik santrallerinde, kaynak sıcaklığı yaklaşık olarak 200-260 °C aralığındadır. Sistem verimi %30-35 arasında değişmektedir. Sistemin ilk yatırım maliyeti hesaplıdır ve çok karmaşık bir yapıya sahip değildir. Bu sistemde, ayrıştırıcıda, düşük basınçta akışkan bulunmaktadır.

Bu sistemlerde, buhar sıvıdan ayrıştırıldıktan sonra buhar türbine elektrik üretmek için gönderilirken, kalan akışkan yer altına enjekte edilir. Türbinden çıkan buhar bir soğutma kulesinde veya püskürtme havuzunda elde edilmiş soğutma suyu ile yoğuşturulur ve yer altına enjekte edilir. Jeotermal santralin bulunduğu yerde ırmak ve göl gibi bir soğuk su kaynağı varsa yoğuşurmada bu su da kullanılabilir. Bütün yoğuşturuculu jeotermal buhar çevrimlerinde yoğuşturucularda vakum oluşturmak için buhar ejektörleri kullanılır (Atalay 2004).



Şekil 4.4: Tek flaşlı buharlı güç santrali şematığı (Coşkun ve diğ. 2009)

Şekil 4.4'den de görüleceği üzere tek flaşlı buharlı güç santrallerinde, yüksek basınçlı ve akışkan ağırlıklı jeotermal akışkana kısma vanası vasıtasıyla bir miktar kısma uygulanarak basıncı düşürülür. Böylelikle içeriğindeki buhar oranı arttırılarak ayrıştırıcılara gönderilir. Çift fazlı akışkan ayrıştırıcı vasıtasıyla bir kez flaşlama işlemine tabi tutulur, böylelikle sıvı ve buhar fazın tamamen birbirinden ayrılması sağlanır. Buhar fazı önce yaklaşık olarak %99,99 saf buhar haline getirilmek üzere nem alıcılara oradan da mekanik enerjiye dönüştürülmek üzere türbine gönderilirken, ayrıştırıcıda kalan sıvı faz ise geri basma kuyularına basılmak üzere geri basma pompalarına iletilir (Halaçoğlu 2015).

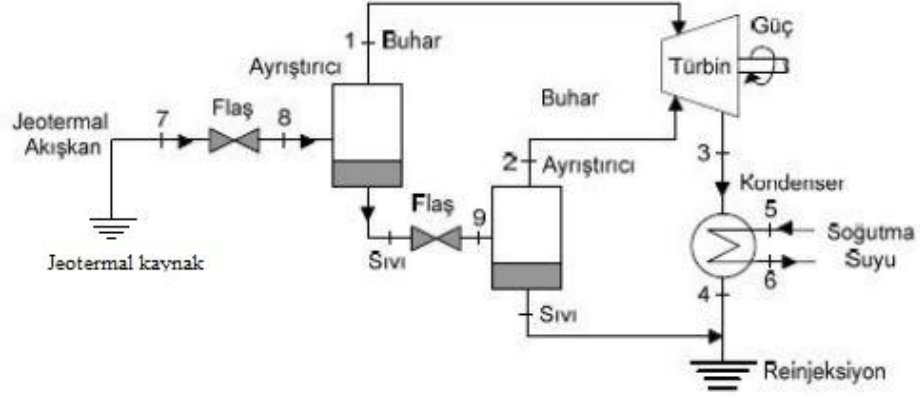
Bu tip santraller, doğrudan buhar santralleri ile mukayese edildiğinde temel farklılığın ürettikleri atık sıvı miktarında olduğu görülmektedir. Örneğin 55 MW'lık bir güç için, tek flaşlı bir santral 630 kg/s atık sıvı üretirken, doğrudan buhar santrali 20 kg/s'lik atık üretmektedir.

Eğer tüm atık sıvı reenjeksiyon yapılırsa, tek flaşlı bir santralde üretilen kütlelerin yaklaşık %85'i kaynağa geri dönerken, doğrudan buhar çevrimli santrallerde bu oran %15'tir (DiPippo 1999).

#### **4.1.3.2 Çift Flaşlı Çevrim**

Çift flaşlı santraller, tek flaşlı santrallerin bir üst teknolojisi olarak kullanılmakta ve aynı jeotermal akışkan debisiyle yaklaşık olarak %15-25 daha fazla güç üretilmesine olanak sağlamaktadır. Tek flaşlı santrallere kıyasla daha fazla ekipman, bakım maliyeti vb. dezavantajları olmasına karşın, üretilen fazla güç tüm bu dezavantajları karşılayabilecek nitelikte olmaktadır (Coşkun ve diğ. 2009).

Şekil 4.4'ten de görülebileceği üzere, çift flaşlı buhar çevrimli santrallerde iki kademedeki flaşlama yapılmaktadır. Her iki kademedeki elde edilen buhar ayrı ayrı türbinlere gönderilebileceği gibi Şekil 4.3'deki sisteme benzer bir şekilde aynı türbin gövdesi altında farklı kanat kademelerine de iletebilmektedir (Halaçoğlu 2015).



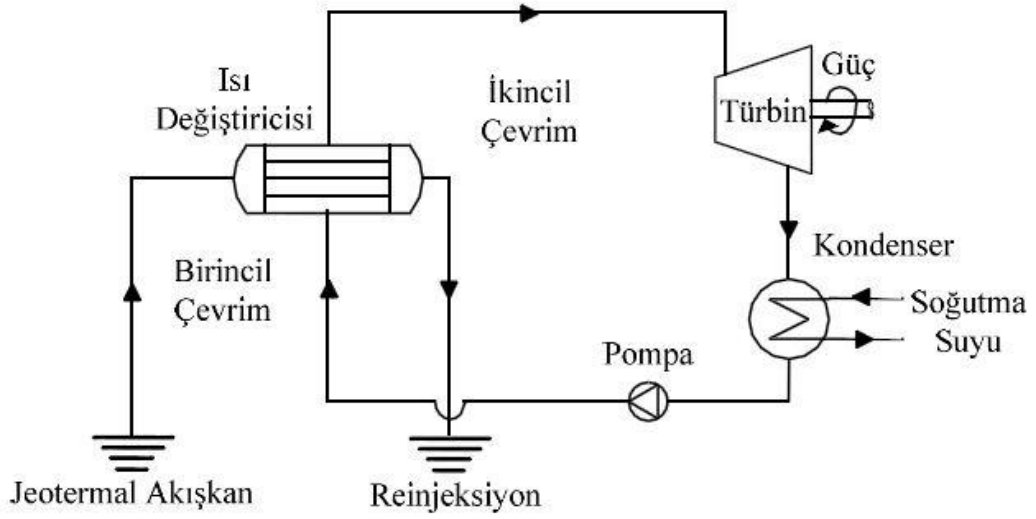
**Şekil 4.5:** Çift flaşlı buhar çevrimli santral şematığı (Coşkun ve diğ. 2009)

Flaşlama teknolojisinde ticari türbin-jeneratör ünitelerinin kapasitesi 10-55 MW arasındadır. 20 MW'lık standart kapasitelerdeki üniteler de bulunmaktadır (Barbier 2002).

ABD-Nevada'da bulunan Beowawe jeotermal güç santrali çift flaşlı santral olup, 1985 yılında işletmeye alınmıştır. Santralde 16 MW güç üretilmekte olup, jeotermal akışkanın kaynak sıcaklığı 215 °C ve debisi ise 157,5 kg/s'dir (DiPippo 1999).

#### 4.1.4 İkili (Binary) Çevrim

Kuru buhar ve flaşlı güç sistemlerinde kullanılan yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanın aksine, bir ikili sistem düşük sıcaklıklı jeotermal akışkanların kullanılmasına en uygun olanıdır. Böyle bir güç sisteminin dünyadaki jeotermal enerji santrallerinin yaklaşık %45 ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Bertani 2012). Tipik bir ikili güç istasyonunda, jeotermal akışkanın sıcaklığı 70 ile 180 °C arasında değişebilir. Jeotermal akışkan, sıcaklığının ikincil bir çalışma akışkanına geçirildiği jeotermal bir ısı değiştirici ünitesinden pompalanır. İkincil çalışma akışkanı (izopentan gibi) daha sonra sudan daha düşük bir sıcaklıkta kaynar ve elektriği üreten türbini döndürmek için ısıyı taşır. Bir ikili güç sisteminin büyük bir avantajı, jeotermal akışkanın, üst güç üretim cihazları ile hiçbir zaman temas etmemesidir. Bunun yerine, güç sisteminin korozyon sorunlarını en aza indirgeyen jeotermal rezervuara tamamen yeniden enjekte edilir (Halaçoğlu 2015).

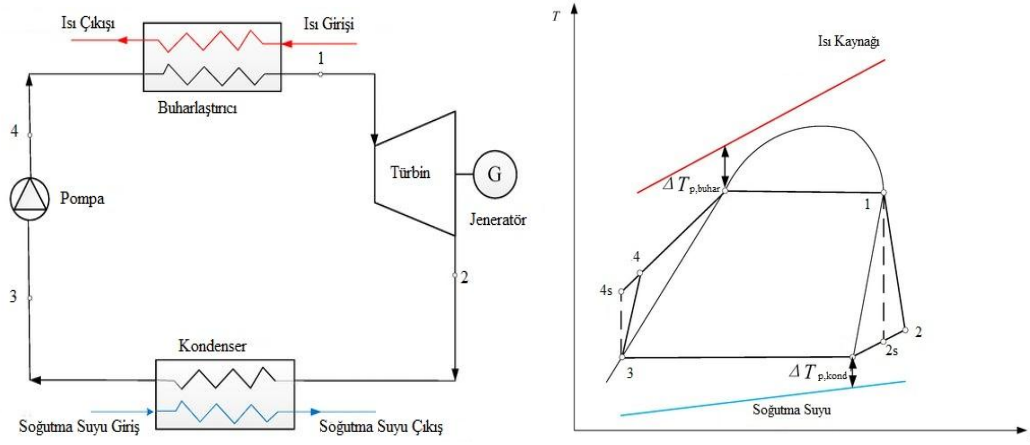


Şekil 4.6: Binary (ikili) jeotermal güç santralinin tesis seması

#### 4.1.4.1 Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)

Organik Rankine çevrimi (ORÇ) sistemi ülkemizde yeni bir teknoloji olmasına rağmen dünya genelinde birçok bölgede uzun yıllardır kullanılmaktadır. ORÇ çalışma prensibi bilinen Rankine çevrime çok benzerdir. Rankine çevrimindeki iş yapan akışkan olan su yerine, daha düşük sıcaklıkta buhar fazına gelen ve yüksek basınçlara ulaşabilen organik akışkanlar kullanılır.

Basit organik Rankine çevrimi 4 ana elemandan oluşur, bunlar; pompa, buharlaştırıcı, türbin ve kondenserdir. Çevrimde kullanılan organik akışkan pompa aracılığıyla basınçlandırılarak buharlaştırıcıya gönderilir, buharlaştırıcı olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir, yenilenebilir bir kaynaktan alınan ısıyı, organik akışkana aktarır. Bu işlem sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Ardından organik türbine gönderilerek mekanik işe dönüştürülür. Daha sonra kondensere dönerek tekrar sıvı hale gelir. Çevrim bu döngüde devam eder. Şekil 4.7'de basit ORÇ sisteminin çalışma prensibi ve T-S diyagramı görülmektedir.



**Şekil 4.7 : Basit ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı**

## 4.2 Güneş Isıl Enerjisi

Güneş sisteminin merkezinde bulunan Güneş, orta büyüklükte bir yıldızdır. Güneş, Güneş Sistemi kütesinin yüzde doksan dokuzu oluşturur. Kalan sistem kütesi gezegenler, asteroitler, kozmik toz ve mavi taşır. Güneş tarafından yayılan enerji, güneşin çekirdeğindeki füzyon işleminin parlak enerjisidir. Tüm güneş ışınımı dünya yüzeyine ulaşamaz. Işığın yüzde otuzu atmosfere yansır. Güneş, nükleer enerji dışında doğrudan veya dolaylı olarak tüm enerjilerin kaynağıdır (Çakıcı 2016).

### 4.2.1 Doğrusal Yoğunlaştırıcı Sistem

Fotovoltaik uygulamalardaki artışa rağmen, fotovoltaik teknolojisi, karmaşıklığı ve yüksek maliyeti nedeniyle büyük miktarda elektrik üretmek için yetersizdir. Güneş enerjisi uygulamalarında elektrik üretmek için farklı teknolojiler kullanılabilir. Konsantre güneş enerjisi sistemleri bunlardan biridir. Bu sistemler orta ve yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygundur. Bu sistemlerin temel dezavantajları şunlardır: Manuel kontrol işlemi, güneş takip sistemine ihtiyaç duyulması ve bakım maliyeti yüksek.

Parabolik Oluk, parabolik (çukur ayna şeklindeki) yansıtıcıların, yansıtıcıların odak noktasına yerleştirilmiş bir alıcıda güneş ışığını toplamaları ile çalışır. Buradaki alıcı, yansıtıcıların odak noktaları doğrultusunda uzanan ve içinde çevrim akışkanının bulunduğu bir tüpten oluşur. Yansıtıcı, gün boyunca güneşi takip



mekanizmaları ile takip eder. Çevrim akışkanı, alıcı içinde ilerletilirken (erimiş tuz ve diğerleri) 150-350 °C civarında ısınır. Ardından, ısı enerjisi kaynağı olarak enerji üretim tesisinde kullanılır. Parabolik oluk sistemler, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri arasında en gelişmiş olanıdır. Parabolik Sistemlerin kurulumu için tam anlamıyla düz ve “0” (sıfır) eğimli araziler gerekmektedir. Bu bakımdan arazinin sistem kurulumuna hazırlanması uzun ve maliyetli bir iştir. 15 MW gücünde bir Parabolik Oluk Güneş Enerji Sistemi 135 bin m<sup>2</sup> alan kaplar iken, ilk yatırım maliyeti 130 milyon dolardır (Tespam 2018).

**Tablo 4.2:** Parabolik oluk tipi güneş kolektörlerin bazı özellikleri

Tip	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Malzeme Türü	İşlev
Düşük Sıcaklık	150	6-10	Bakır boru	Sıcak su üretimi
Yüksek sıcaklıkta yağ veya jeotermal akışkan	400	25-100	Paslanmaz çelik/Kovar boru	Minimum 5-7 saat ısı depolamalı veya yenilenebilir enerji ile hibrit
Doğrudan su çevrimi	350-500	70-100	Paslanmaz çelik/Kovar boru	Geliştirilmekte olan tesisler

Konsantre kolektörlerde iki ana parça bulunur: Reflektör yüzeyi ve emme borusu. Gelen güneş ışını reflektör yüzeyi (ayna) tarafından yansıtılır ve emici içinde toplanır. Daha sonra, emici içindeki akışkanın sıcaklığı artar ve ısı enerjisi, ısı eşanjörleri ile başka bir çalışma akışkanına aktarılır. Elektrik, türbin ve jeneratör gibi bazı ekipmanların yardımı ile çalışma akışkanının enerjisi kullanılarak üretilir. Parabolik oluk toplayıcıları doğrusal odak yoğunlaştırıcıları içinde bir sistem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de, parabolik oluk kolektörleri gösterilmektedir.



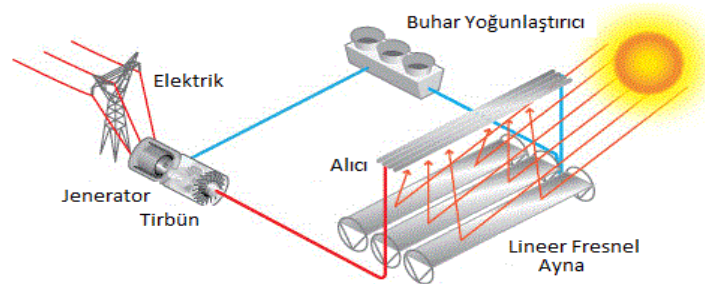
**Şekil 4.8:** Parabolik oluk tipi güneş kolektörleri (Url-10 2019)

Alıcıda, yüksek kaynama noktasına sahip ısı aktarma akışkanı (HTF), çalışma akışkanı olarak seçilir. Çalışma koşullarına göre sentetik yağ veya erimiş tuz tercih edilir. Kullanılan HTF tipi, çalışma sıcaklığı aralığını ve böylece güneş alanında elde edilen maksimum verimliliği belirler. HTF tipinin seçimi, güneş enerjisi termik santralının tipini etkiler. Güneş parabolik oluk tarlalarında kullanılan bazı HTF'ler, Tablo 4.3 de gösterilmiştir (Price ve diğ. 2002).

**Tablo 4.3:** Güneş parabolik oluk alanlarında kullanılan ısı transfer akışkanları (Çakıcı 2016).

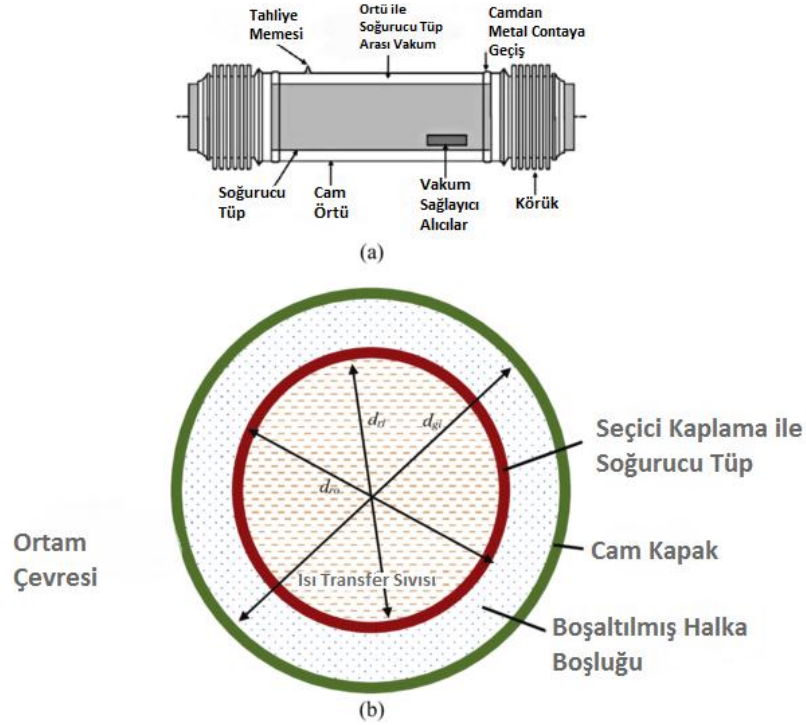
Akışkan	Uygulama Sıcaklığı (°C)	Özellikler
Sentetik yağ, VP-1	(13)-(395)	Nispeten yüksek uygulama sıcaklığı, yanıcı
Mineral yağ	(-10)-(300)	Nispeten ucuz, yanıcı
Su, basınçlı, glikol	(-25)-(100)	Sadece düşük sıcaklıklı IPH uygulamaları
Su/Buhar	(0)-(500)	Yüksek alıcı basıncı gerekli
Silikon yağ	(-40)-(400)	Toksik olmayan, pahalı, yanıcı
Nitrat tuzu	(220)-(500)	Yüksek donma sıcaklığı, aşındırıcı
İyonik sıvılar	(-75)-(416)	İyi termal özellikleri, çok pahalı, hiçbir kitle ürün
Sentetik yağ, VP-1	(13)-(395)	Nispeten yüksek uygulama sıcaklığı, yanıcı

Diğer bir doğrusal odak yoğunlaştırıcı sistem ise Fresnel yoğunlaştırıcı aynasıdır. Fresnel aynaları gömme dikişli düz bir ayna ve bir alıcıdan oluşur. Alıcı düz aynanın ortasında bulunur. Güneş ışığı daha geniş bir yüzeyde toplanır ve çalışan bir akışkan kullanmadan ısı üretmek mümkündür; ancak toplam verimlilik yoğunlaştırılmış sistemden daha düşüktür. Bu nedenle sistem yaygın olarak kullanılmamaktadır (Çakıcı 2016). Şekil 4.10'da bir doğrusal Fresnel toplayıcısının bir çevrimde örneği bulunmaktadır.



**Şekil 4.9:** Doğrusal fresnel toplayıcıları (Url-11 2019)

Reflektör yüzeyinin odak eksenine bir boru şekilli alıcı yerleştirilmiştir. Boru şeklindeki bir alıcı malzeme genellikle bakır, alüminyum veya paslanmaz çelikten yapılır. Bakırın ısı iletkenliği diğer malzemelerden daha iyidir; ancak, bakır piyasada daha pahalıdır. Bu nedenle, genellikle paslanmaz çelik tercih edilir. Güneş ışımalarının büyük bir kısmı alıcı tarafından emilir. Alıcı, düşük yansıtma oranına ve yüksek emme oranına sahip özel bir malzeme ile kaplanmıştır. Bu malzeme kısa dalga boyunu emer; uzun dalga boyunun küçük bir kısmı yansır (Öztürk ve diğ. 2009). Alıcıda toplanan ısı sıvıya aktarılır. Alıcının sıcaklığı, ortam sıcaklığından daha yüksektir. Isı transferi, ortam ile alıcı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle gerçekleşir. Bu ısı kaybını azaltmak için alıcı cam kapak ile kaplanmıştır (Öztürk ve diğ. 2009). Şekil 4.9’da bir alıcının bir kısmının şemasını vermektedir.



**Şekil 4.10:** (a) Her iki tarafı açık vakumlu parabolik güneş alıcı tüp, (b) vakumlu tüpün içyapısı (Öztürk ve diğ. 2009)

#### 4.2.1.1 Noktasal Yoğunlaştırıcı Sistem

Konsantre güneş enerjisi sistemleri için en önemli terim yoğunlaşma oranıdır. Konsantrasyon oranı, alıcının açıklık alanının yüzey alanına oranı olarak tanımlanır. Güneş ışığı, yansıtıcı yüzey tarafından doğrusal veya nokta bir şekilde konsantre edilir. Parabolik tipte nokta odaklama yoğunlaştırıcılarıdır ve yüksek yansıtıcılığa

sahip yansıtıcı bir film ile kaplanmıştır. Gelen güneş ışığı alıcıya ayna ile yönlendirilir. Şekil 4.11'de bir parabolik çanak yoğunlaştırıcı gösterilmektedir.



**Şekil 4.11:** Parabolik çanak yoğunlaştırıcı (Url-11 2019).

Güneş kulesi sistemi genellikle iki eksenli bir takip sistemi, reflektör aynaları (heliostatlar) ve kulenin tepesinde bulunan bir alıcıdan oluşur. Heliostatlar güneş ışığını alıcıya yansıtır. Alıcıdaki çalışma akışkanının çalışma sıcaklığı 1000 °C'ye kadar yükselir. Isı, kulenin altındaki güç istasyonuna aktarılır. Elektrik üretimi gaz veya buhar türbinleri tarafından sağlanır. Bu sistemin elektriksel verimi, PTSC'lerden daha yüksektir. Şekil 4.12'de İspanya'da bulunan bir güneş kulesini göstermektedir.

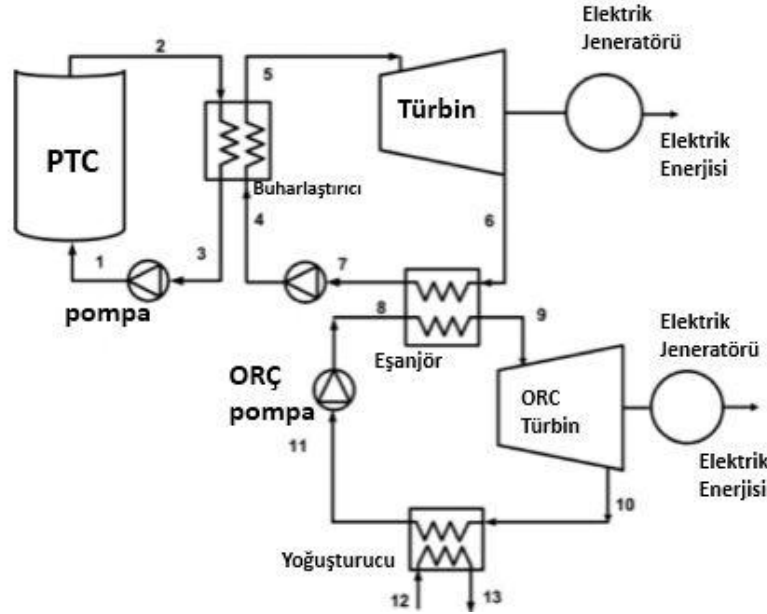


**Şekil 4.12:** İspanya'daki güneş kuleleri (Url-11 2019).

### 4.3 Jeotermal ve Güneş Enerjili Hibrit ORÇ Sistemleri

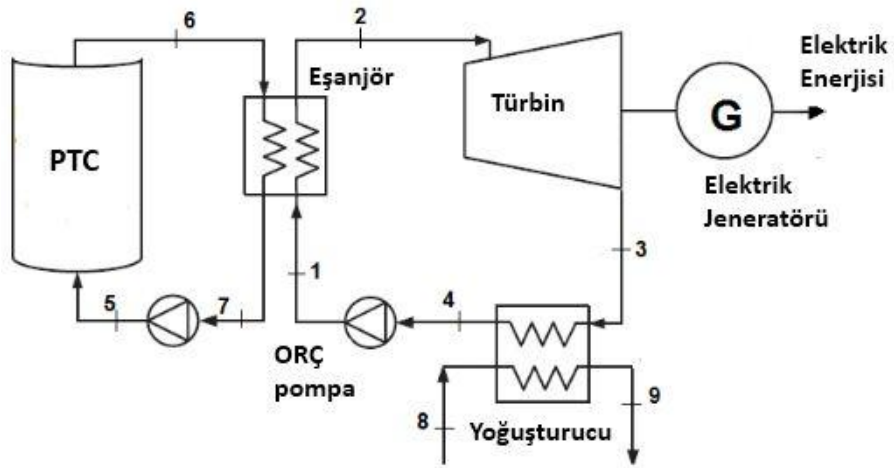
Yerin derinliklerinden elde edilen sıcak su veya buhar, ikili çevrimler aracılığıyla elektrığe dönüştürülebilir. Gelişen teknoloji sayesinde güneş enerjisi PTC uygulamalarında yüksek sıcaklara çıkmak mümkün olmaktadır. Bu sıcaklık ile ORÇ sistemleri kurulup elektrik üretmek mümkün hale gelmiştir. Kaynak sıcaklık olarak

bir güneş kolektöründen geçen akışkanın ısısını kullanan ORÇ sistemleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. Şekil 4.13'te hibrit ikili çevrimin basit bir yapısı görülmektedir.



Şekil 4.13: Hibrit ikili ORÇ'li elektrik santrali (Al-Sulaiman 2013).

İkili çevrimlerde, üretim kuyusundan gelen jeotermal akışkan, parabolik oluk tipi güneş enerji sisteminin buharlaştırıcısı olarak kullanılan ısı değiştiricisine girerek, enerjisini, daha düşük sıcaklıklarda buhar fazına geçebilen organik akışkana aktarır. Şekil 4.14'de organik akışkanın olduğu çevrim ORÇ çevrimidir. Bu sisteme ikili çevrim denmesinin nedeni sistemin iki akışkan oluşmasındandır. Bu çevrim özellikle düşük sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan elektrik elde etmek için etkili yöntemdir.



Şekil 4.14: Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri (Al-Sulaiman 2013)

Bu sistemlerde elektrik üretmek, fotovoltaik pillerden daha ucuza mal olmaktadır. Ayrıca yoğuşturucu suyu farklı uygulamalarda kullanılabilir. Fakat yeterli güneşin olmadığı zamanlarda, sistem çalışmayacağı için bu tarz sistemler genellikle başka bir enerji kaynağı (biokütle, fosil yakıtlı kazan, atık ısılar vb.) ile entegre edilerek (hibrit) çalıştırılmaktadır (Al-Sulaiman 2013).

#### 4.4 Çift Akışkanlı Santrallerde Kullanılan İkincil Akışkanlar

Çift akışkanlı çevrimler için alternatif akışkanların (izobütan, n-pentan, R113 ve R114) incelemesi yapılmıştır. İkincil akışkanların kritik basınç ve sıcaklıkları Tablo 4.4'te verilmektedir.

**Tablo 4.4:** İkincil akışkan özellikleri (Yılmaz 2013)

Akışkanın cinsi	Kritik basıncı (kPa)	Kritik sıcaklığı (°C)
İzobütan	3640	134,7
n-pentan	3364	196,5
R113	3439	214,1
R114	3289	145,7

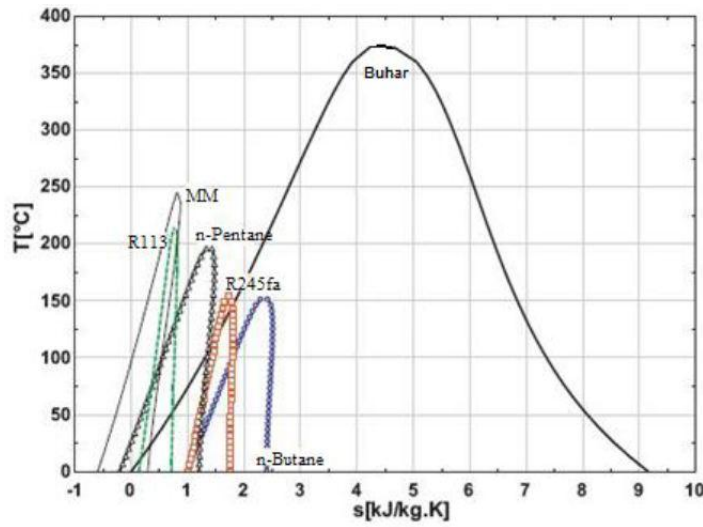
İzobütan, çift akışkanlı çevrimler için alternatif akışkan olarak ön plana çıkmaktadır. Düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen bu akışkanların doymuş buhar eğrileri pozitif eğime sahip olduğundan türbin çıkış şartlarında, buhar hala kızgın buhar olmaktadır. Bu sebeple, türbindeki genişleme esnasında nem ile karşılaşmadığından dolayı türbin aşınmaları önlenmektedir (Coşkun 2011). Ayrıca, izobütan nispeten yüksek ısı kapasiteye sahip olup, güvenli akışkanlardır. Korozyon ve zehirli özellikleri yoktur (Barbier 2002).

Ülkemizdeki çift akışkanlı jeotermal güç santrallerinde yaygın olarak kullanılan n-pentan ise yüksek moleküler ağırlığı ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek moleküler ağırlığı ile türbin boyutlarının küçülmesine izin verilmektedir. n-pentanın kullanılmasıyla, türbinlerin son kanatlarında oluşan korozyon tehlikesi de ortadan kalkmaktadır (Toksoy ve diğ. 2007).



R-113 ve R-114 gibi kloroflorokarbonlar (CFC) iyi birer çalışma akışkanı olarak dikkat çekmekte olup, jeotermal güç santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak, CFC'ler içerdikleri klorin ile birleşmeleri sonucu ozon tabakasına zarar vermektedirler. Bu sebeple, piyasadaki üretici firmalar çevresel açıdan daha uygun olan akışkanların üretimine başlamışlardır (Arslan 2008).

ORÇ sistemleri, basit rankine çevrimi prensibine göre çalışan sistemlere göre daha düşük verim ve sıcaklıkla çalışır. Bu nedenle ORÇ sistemlerinde sudan daha düşük sıcaklıklarda buharlaşan organik akışkanlar kullanılır. Şekil 4.15'te bazı organik akışkanlar ile su buharına ait T-S diyagramları verilmiştir.



Şekil 4.15: Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı (Tchanche ve diğ. 2011)

Su buharı kullanılan sistemlerde organik akışkana göre daima daha yüksek sıcaklık ve basınç vardır. Bu tarz termal güç üretim sistemlerinde su buharı kullanımının da birtakım avantajları vardır. Bunlar;

1. Çok iyi termal ve kimyasal kararlılık (Çürüme Riski Yoktur).
2. Düşük viskoziteden kaynaklanan çok küçük pompa gücü gereksinimi.
3. İyi derecede enerji taşınması (Yüksek gizli ve özgül ısı).
4. Zehirsiz olması, yanıcı özelliğinin olmaması ve aynı zamanda çevreye zararı bulunmaması.
5. Ucuz ve yaygın olarak bulunması.

Buna rağmen suyun çalışma akışkanı olarak kullanılmasında birtakım problemler de vardır (Yılmaz 2013). Bunlar;

1. Genleşme sırasında yoğuşmayı önlemek için aşırı kızdırmaya gerek duyulur.
2. Türbin kanatlarında aşınma riski vardır.
3. Evaporatörde aşınma riski vardır.
4. Karışık ve pahalı türbin yapısı vardır.

Bu sebeplerden dolayı yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda ve büyük ölçekli sistemlerde çalışma akışkanı olarak su kullanmak daha uygundur.

Küçük ve orta ölçekli sistemlere bakıldığında, su yerine uygun bir organik akışkan seçildiğinde karşılaşılan sorunlar kısmen azaltılabilir. Bir organik Rankine çevriminin, geleneksel buhar güç santrallerine göre birçok avantajı vardır bunlar (Tchanche ve diğ. 2011); ( Özden ve diğ. 2011);

1. Buharlaşma süresi boyunca daha az ısıya ihtiyaç vardır.
2. Buharlaşma işlemi düşük basınç ve düşük sıcaklıkta gerçekleşir. Bu nedenle, mekanik ve termal gerilim buhar türbinlerine göre daha düşük seviyelerdedir.
3. Genleşme süreci buhar bölgesinde biter ve bu nedenle aşırı kızdırmaya gerek duymaz. Böylelikle türbin kanatlarındaki aşınma riski azalır.
4. Buharlaşma ve yoğuşma arasındaki sıcaklık farkı ayrıca şu anlama gelmektedir. Basınç düşüşü daha az olacaktır ve bu nedenle basit tek kademeli türbin kullanılabilir.
5. ORÇ sistemleri düşük sıcaklık ve basınç aralığında çalıştığı için bir operatöre ihtiyaç duymaksızın çalışabilir. Otomasyon sistemleri ile uzaktan kontrol edilebilen sistem, daha az personel ihtiyacına gerek duyduğu için işletme masraflarını düşürür.
6. ORÇ sistemlerinde yüksek türbin verimi söz konusudur (%85). Organik türbinler buhar türbinine kıyasla daha düşük devirlerde çalışırlar, bu durum hem mekanik zorlanmayı azaltır hem de jeneratöre doğrudan bağlantı sağlanabilir.
7. ORÇ sistemleri, çalıştırma-durdurma işlemlerinin kolaylığı, otomatik kontrol imkânlarının yüksek olması, güvenli ve yüksek derecede uyumluluğa sahip olması açısından, ciddi bakım masraflarının olmamasından dolayı uzun ömürlü sistemlerdir (20 yıl ve üzeri).



## 5. DENİZLİ KOŞULLARINDA HİBRİT SİSTEM MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

### 5.1 EES Bilgisayar Programı

Hibrit çevrimlerde kullanılan ikincil akışkanın termodinamik özellikleri EES bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. EES (Engineering Equation Solver) bilgisayar programı, lineer ya da lineer olmayan, matematiksel veya diferansiyel denklemleri çözümlenebilen bir programdır. Program, matematik fonksiyonlarının dışında özellikle termodinamik fonksiyonları kapsar ve kullanıcının ek veri işlemesine olanak sağlar. Fakat EES, termodinamik problemleri otomatik olarak çözmez, sadece kullanıcının yazdığı denklemleri çözmektedir. Kullanıcı problemi anlamak ve formülize etmek için, fiziksel yasa ve bağıntıları uygulamak zorundadır (Çengel ve Boles 2000).

EES programı yardımıyla, termodinamik özellikler tablolara tek tek bakılmadan bulunabilmekte, bir problem çözümünde yapılan bütün hesaplamalar, parametrik analiz ve optimizasyon işlemlerinin de yapılmasını sağlayabilir. Bu program vasıtasıyla, nemli hava, su, çeşitli gazlar, hava ve birçok soğutucu akışkanın iç enerji, entropi, entalpi, özgül ısı, nem oranı, özgül ısı, gibi termodinamik özellikler bulunabilmektedir. Ayrıca birçok termodinamik özellik fonksiyonunun içerisine yerleştirildiği bu programda ayrıca birçok matematiksel fonksiyonu da içermektedir (Çengel ve Boles 2000).

Temelde bir denklem çözücü olan bu programa çok sayıda denklem herhangi bir sırayla girilebilir ve denklem sayısı bilinmeyen sayısı aynı olduğu sürece çözüm tek bir dokunuşla elde edilebilir (Kanoğlu, 2003).

Çalışmada kullanılan çevrimlere giren jeotermal akışkan için entalpi, entropi, basınç ve sıcaklık ifadeleri EES programında sırasıyla,

$$h[1]=\text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS},T=T[1],x=0)$$

$$s[1]=\text{Entropy}(\text{Steam\_IAPWS},T=T[1],x=0)$$

$$P[1]=\text{Pressure}(\text{Steam\_IAPWS},T=T[1],x=0)$$

$$T[1]=\text{Temperature}(\text{Steam\_IAPWS},P=P[1],x=0)$$

olacak şekilde yazılabilir. Burada; P basıncı, T sıcaklığı, x ise kuruluk derecesini (buhar oranı) göstermektedir. Programda saf maddelerin özelliklerinin bulunabilmesi için iki bağımsız özelliğin belirtilmesi yeterlidir. *Çift akışkanlı çevrimlerde kullanılan ikincil akışkanlar* arasında yer alan izobütanın özellikleri,

$$h[2] = \text{Enthalpy}(\text{Isobutane}, T=T[2], P=P[2])$$

$$s[2] = \text{Entropy}(\text{Isobutane}, T=T[2], P=P[2])$$

$$x[2] = \text{Quality}(\text{Isobutane}, T=T[2], P=P[2])$$

şeklinde ifade edilebilir. Flaşlı veya çift akışkanlı çevrimlerdeki jeotermal ve ikincil akışkanların farklı şartlardaki termodinamik özellikleri, yukarıdaki ifadeler gibi yazılarak bulunabilmektedir.

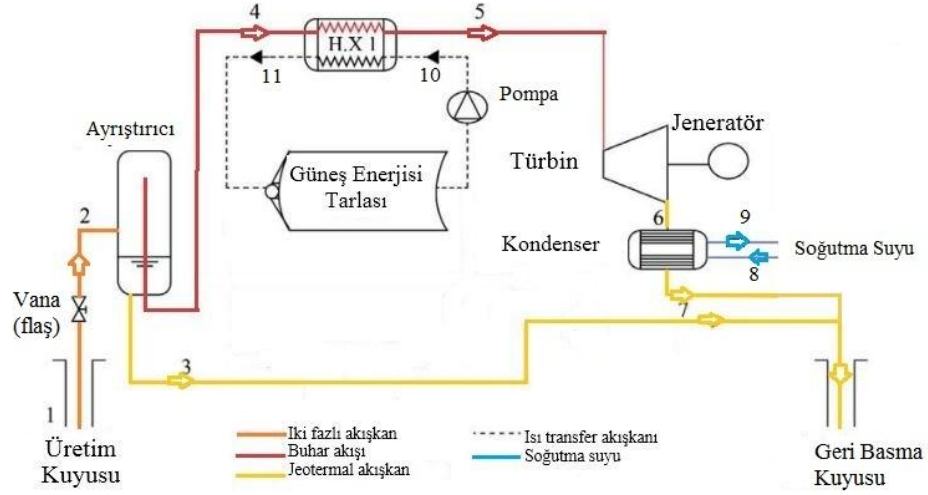
Akışkanın fazı olan y değeri,

- $0 < y < 1$  aralığında ise doymuş,
- $y = -0,01$  ise sıkıştırılmış sıvı,
- $y = 1,01$  ise kızgın buhar

şeklinde değişmektedir.

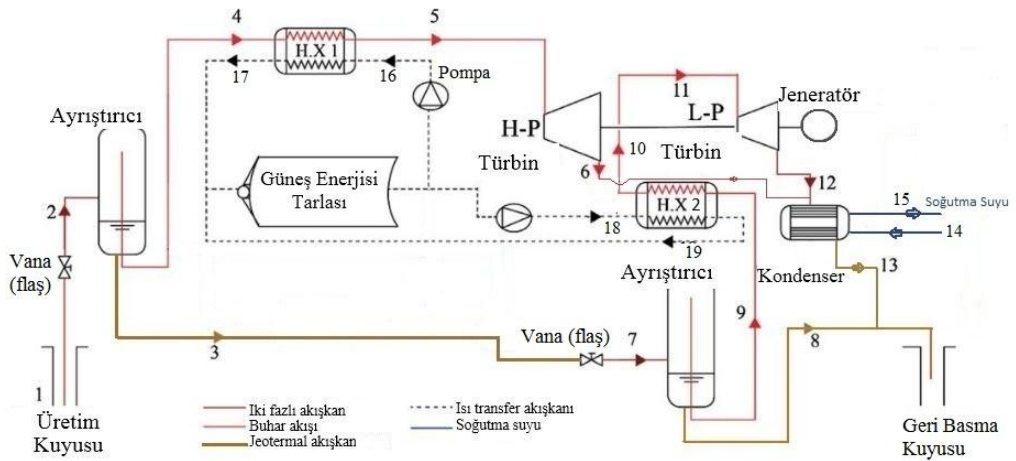
## 5.2 İlgili Hibrit Çevrimlerin Şemaları

Şekil 5.1’de tek flaşlı hibrit sistemin şeması gösterilmektedir. Üretim kuyusundan çıkan jeotermal akışkan flaş işleminin ardından ayrıştırıcıda sıvı ve gaz olmak üzere iki faza ayrışır. Gaz fazı, eşanjör-1 (H.X 1)’den geçerken güneş enerjisi tarlasından aldığı ısıyla entalpisini artırır. Türbinde genleşen ve güç üreten akışkan kondenserde yoğunlaştırularak geri basma kuyusuna gönderilir. Sıvı faz ise geri basma kuyusuna gönderilir.



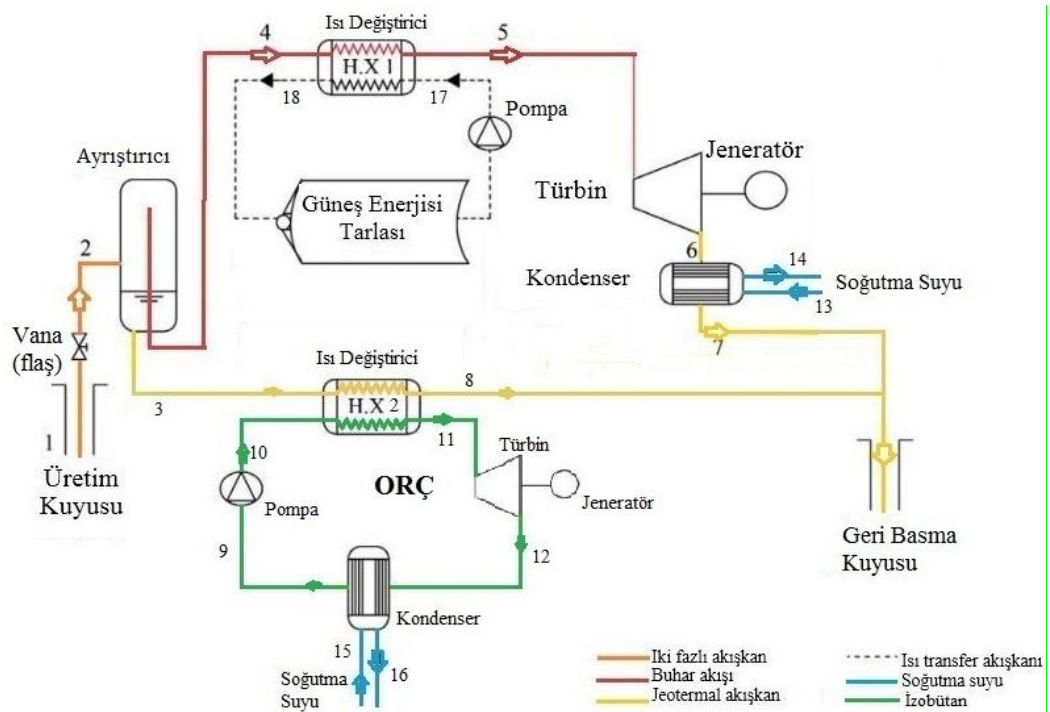
**Şekil 5.1:** Tek flaşlı hibrit sistem

Şekil 5.2’de çift flaşlı hibrit sistemin şeması gösterilmektedir. Üretim kuyusundan çıkan jeotermal akışkan flaş işleminin ardından birinci ayırıştırıcıda sıvı ve gaz olmak üzere iki faza ayrışır. Gaz fazı, eşanjör-1 (H.X 1)’den geçerken güneş enerjisi tarlasından aldığı ısıyla entalpisini artırır ve yüksek basınçlı türbinde güç üretmiştir. Sıvı faz ikinci kez flaşlanarak ikinci ayırıştırıcıda bir miktar buhar daha elde edilir. Güneş enerjisi tarlasından eşanjör-2 (H.X 2) ile ısı alan buharın entalpisi yükselmiş ve düşük basınçlı türbinde güç üretilmiştir. Islak buhar kondenserde sıvı faza getirilerek ikinci ayırıştırıcıdaki sıvı fazdaki akışkanlar beraber geri basma kuyusunu gönderilir.



**Şekil 5.2:** Çift flaşlı hibrit sistem şeması

Şekil 5.3’de çift akışkanlı hibrit sistemin şeması gösterilmektedir. Üretim kuyusundan çıkan jeotermal akışkan flaş işleminin ardından ayırıştırıcıda gaz ve sıvı faza ayrışır. Jeotermal akışkan gaz fazı güneş tarlasındaki ısı değiştiricisinde kızdırılır ve türbinde güç elde edildikten sonra kondenserde sıvılaştırılarak geri basma kuyusuna gönderilir. Ayırıştırıcıdan çıkan sıvı fazdaki jeotermal akışkan Organik Rankine Çevriminin ısı kaynağı olarak kullanılır ardından geri basma kuyusuna gönderilir. Isı değiştiricinde jeotermal akışkan ve organik akışkan olan izobütan arasında ısı transferi meydana gelir. ORÇ güç üretimi sağlanarak hibrit sistemin sabit güç üretimi durumunda jeotermal akışkan tüketimi azaltılmış olur.



Şekil 5.3: Çift akışkanlı hibrit sistem şeması

### 5.3 Çevrimlerin Termodinamik Analizleri İçin Yapılan Kabuller

1. Ölü hal sıcaklığı ve ölü hal basıncı sırasıyla 25 °C ve 100 kPa,
2. Türbin ve pompanın izentropik verimleri 0,85,
3. Çift akışkanlı çevrimlerde iş akışkanı olarak izobütan,

4. Flaşlama işlemi, DiPippo (2013) çalışmasına göre kinetik veya potansiyel enerjide meydana gelen değişiklikler ihmal edilerek, izentropik olarak gerçekleşir,
5. Çift akışkanlı çevrimlerdeki ısı değiştiricilerin dirsek noktası sıcaklık farkı ( $\Delta T_{pn}$ ) =5 °C (üretici tarafından verilir),
6. Çift akışkanlı çevrimler için ısı değiştiricilerin etkinliği 0,80,
7. Tüm çevrimlerde kullanılan su soğutmalı kondensere giren soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 18 °C ve 28 °C (Çengel ve Boles, 2008),
8. Üretilen gücün %10'unun (Kanoğlu ve Çengel, 1997) santraller içinde (pompa, fan, vs.) tüketildiği kabul edilmektedir.

**Tablo 5.1:** Denizli hibrit sistemin referans koşulları (Url-4 2019); ( Url-9 2019)

Parametreler	Değer
Ortam sıcaklığı	16,3 °C
Ortam basıncı	0,8 bar
Isı eşanjörü etkinliği	%80
Ortalama güneş ışınımı	1591 W/m <sup>2</sup> -yıl
Isı transfer akışkanın maksimum sıcaklığı	400°C

#### 5.4 Termodinamik Analizde Gereken Eşitlikler

Termodinamiğin birinci kanununa göre kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal edecek şekilde (5.1) eşitliği kütle korunumu gösterilmiştir.

$$\sum_g \dot{m}_g = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \quad (5.1)$$

Enerji korunumu kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal edecek şekilde (5.2) eşitliğinde gösterilmiştir. Burada “g” girişi, “ç” çıkışı göstermekte olup  $\dot{Q}$  ve  $\dot{W}$  net ısı ve iş girdisi,  $\dot{m}$  kütleli debi,  $h$  entalpidir.

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_g \dot{m}_g \cdot h_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \cdot h_{\zeta} \quad (5.2)$$

Ekserji bağıntısı ise  $\dot{X}_c$  ekserji çıkışı,  $\dot{X}_g$  ekserji girişi ve  $\dot{X}_{kayıp}$  ekserji kaybıdır. Isı ile ekserji transferi ( $\dot{X}_{ısı}$ ), (5.3) eşitliği kullanılarak elde edilebilir.

$$\dot{X}_{ısı} - \dot{W} = \sum \dot{X}_{k\ddot{u}tle,c} - \sum \dot{X}_{k\ddot{u}tle,g} + \dot{X}_{kayıp} \quad (5.3)$$

Isı ile ekserji transferi ( $\dot{X}_{ısı}$ ), (5.4) eşitliğinde olduğu gibi gösterilebilir.

$$\dot{X}_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (5.4)$$

Burada,  $T_0$  ortam sıcaklığı ve  $T$  ısı kaynağının sıcaklığıdır.

## 5.5 Jeotermal Rezervuar

Jeotermal akışkanın toplam kütle debisi ile basınç arasındaki ilişki, (5.5) eşitliğinde ifade edildiği gibi, kuyu başı basıncının bir fonksiyonudur.

$$\dot{m}_{jeo} = 99.663 - 2.6287P_a + 0.5802P_a^2 - 0.04212P_a^3 \quad (5.5)$$

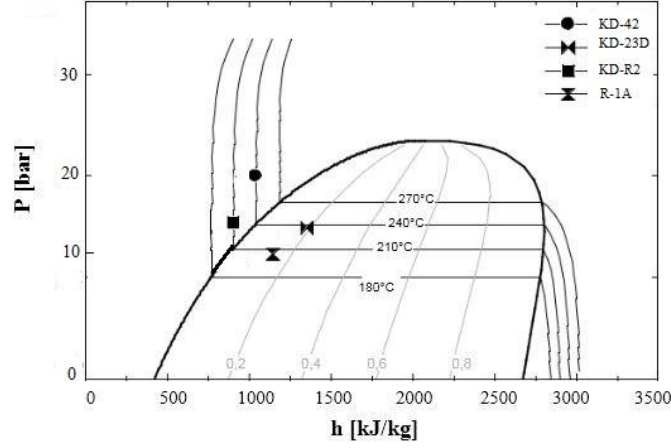
(5.5) eşitliğinde,  $\dot{m}_{jeo}$  kuyudan çıkan akışkanın kütle debisi ve  $P_a$  ayırıcının çalıştığı basınçtır. Jeotermal kaynağın ekserjisi (5.6) eşitliğiyle ifade edilir (Kanoğlu ve diğ. 2012):

$$\dot{X}_{jeo} = \dot{m}_{jeo}(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (5.6)$$

Bu eşitlikte, jeotermal rezervuardaki termodinamik durumu temsil etmektedir. Jeotermal kaynağın ekserjisi sadece rezervuar koşullarını hesaba katmaktadır, jeotermal akışkan ayrışma işleminde üretildiğinde, Pambudi ve diğ. (2014) göre bu olay ekserji kaybı olarak kabul edilmektedir.

**Tablo 5.2:** Jeotermal rezervuar özellikleri (Halaçoğlu 2015)

Kuyu İsmi	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Basınç (bar)
KD-42 (Örnek 1)	242	1038	21,3
KD-23D (Örnek 2)	235	1351	10,4
R-1A (Örnek 3)	208	900	13,3
KD-R2 (Örnek 4)	204	1146	17



Şekil 5.4: Rezervuarın ele alınan termodinamik durumları

## 5.6 Güneş Tarlası Modeli

Bu çalışmada, güneş tarlası ısı transfer akışkanı olarak izopentan kullanan parabolik oluk tipi kolektörlerinden oluşmaktadır. Sistemin performansı Duffie ve Beckman (2013) tarafından geliştirilen ve daha sonra Wendel ve diğ. (2010) tarafından uyarlanan model kullanılarak belirlenmektedir.

Güneş enerjisi ısı enerji çıkışının miktarı, kolektör performansı ve doğrudan normal ışınım kullanımına ilişkin kayıp faktörleri dikkate alınarak (5.7) eşitliğiyle hesaplanmaktadır:

$$\dot{Q}_{\text{güneş}} = A[f_{\text{gölge}}f_{\text{köşe}}\dot{G}_{b,T}(\alpha_1 + \alpha_2 T)f_{\text{kir}}IAM - b_1 T - b_2 T^2] \quad (5.7)$$

Eşitlikte,  $\dot{Q}_{\text{güneş}}$  güneş enerjisi ısıl gücünü, HTF'nin ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkı ve (5.8) eşitliğiyle tanımlanan geliş açısı değiştiricisi (IAM) ifade edilir. Eşitlikte,  $\theta$  kolektör yüzeyindeki doğrudan ışınım geliş açısıdır (Duffie ve diğ. 2013).

$$IAM = 1 + 0.0003178 \frac{\theta}{\cos \theta} - 0.00003985 \frac{\theta^2}{\cos \theta} \quad (5.8)$$

Kolektör sıraları arasındaki gölgelemeden kaynaklanan (5.9) numaralı eşitliğindeki kayıp faktörü ( $f_{\text{gölge}}$ ) aşağıdaki eşitlikte belirtilmiştir:

$$f_{gölge} = \frac{L \cos \theta_z}{w \cos \theta} \quad (5.9)$$

Eşitlikte L, kolektörler arasındaki mesafeye karşılık gelir;  $\theta_z$  güneş ışınlarının zenit açısı ve w, kolektörün genişlik açıklığıdır. Kolektör köşelerinden kaynaklanan kayıp faktörü ( $f_{köşe}$ ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenir:

$$f_{köşe} = 1 - \tan \theta \frac{L_{odak}}{L_{uz}} \quad (5.10)$$

Eşitlikte  $L_{odak}$  kolektörün odak uzaklığı ve  $L_{uz}$  kolektör düzeneğinin uzunluğunu temsil eder. Son olarak, (5.7) numaralı eşitlikteki  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  optik katsayıları,  $b_1$  ve  $b_2$  ısıl katsayıları ve  $f_{kir}$  kirlilik katsayısı Tablo 5.3'te listelenen kolektör özelliklerinde verilmiştir; bu tablo üretici tarafından sağlanan verilere göre düzenlenmiştir (Lüpfert 2001).

**Tablo 5.3:** EuroTrough kolektör özellikleri (Cardemil ve diğ. 2016)

Parametreler	Değer
Optik Verimlilik Katsayısı ( $\alpha_1$ )	+0,75
Optik Verimlilik Katsayısı ( $\alpha_2$ )	0,000045 °C <sup>-1</sup>
Isıl Verim Katsayısı ( $b_1$ )	+0,039 W/m <sup>2</sup> °C
Isıl Verim Katsayısı ( $b_2$ )	+0,0003 W/m <sup>2</sup> °C
Kolektör Genişliği (W)	5,77 m
Odak Uzaklığı ( $L_{odak}$ )	1,71 m
Kirlilik Kaybı Faktörü ( $f_{kir}$ )	0,91
Maliyet (€/M <sup>2</sup> )	200

EuroTrough kolektörü, endüstriyel işlem maksatlı ısı ve elektrik üretimi gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır; nispeten düşük belirgin yatırım maliyeti nedeniyle hibrit sistemlerinde de bu aynı model kullanılmaktadır.

Sistemin kararlı hal koşullarındaki performansını ele almak için, kolektör çevrimi başına kütle debisi kolektörün nominal debisine eşit olacak şekilde sabit 7,7 kg/s olarak kabul edilmiştir.

$$\dot{X}_{HTF} = \dot{m}_{HTF} \cdot [(h_{HTF,çık} - h_{HTF,gir}) - T_0 \cdot (s_{HTF,çık} - s_{HTF,gir})] \quad (5.11)$$



Bu eşitlikte, HTF, çık ve HTF, gir sırasıyla güneş enerji tarlası çıkışı ve güneş enerji girişine karşılık gelir.

Dolayısıyla, hibrit sistemin performansını değerlendirmek için, ikinci kanun verimliliği aşağıdaki ifadeye göre kullanılır:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}}{\dot{X}_{jeo} + \dot{X}_{HTF}} \quad (5.12)$$

Burada,  $\dot{W}$  hibrit sistem tarafından sağlanan net işi,  $\dot{X}_{HTF}$  ve  $\dot{X}_{jeo}$  sırasıyla güneş enerjisi tarlası ile jeotermal sahadan alınan ve ısı transfer akışkanı tarafından sağlanan ekserjiyi göstermektedir. Güneş enerjisi tarlasının ekserjisinin (5.7) eşitliğinde geri dönüşümlü olduğu ve kaybolmadığı kabul edilmektedir (Greenhut ve diğ. 2010); (Turchi ve diğ. 2014).

## 5.7 Türbin

Türbin, çalışma akışkanını genişletir ve enerjisini işe dönüştürür. DiPippo (2012) çalışmasına göre genişleme işleminin adyabatik olduğu varsayılarak ve çalışma akışkanının potansiyel ve kinetik enerjisindeki farklılıkları göz ardı edilerek, türbinin ürettiği güç (5.13) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t \cdot (h_g - h_c) = \dot{m}_t \cdot \eta_t \cdot (h_g - h_{cs}) \quad (5.13)$$

$\dot{W}_t$  türbin güç çıkışı ise,  $\dot{m}_t$  türbinde kütle akış hızıdır,  $h_g$  ve  $h_c$  türbin giriş ve çıkışında çalışma akışkansısı entalpisidir ve  $\eta_t$  izentropik verimliliğidir.

Buhar giriş sıcaklığındaki değişme bağlı olarak, türbin kuru buhar bölgesinde de çalışabilir. Bu durumda, buhar genişmesi izentropik bir işlem olur. Türbin genişlemesindeki buhar sıcaklığı, literatürde önerilen bir ilişki Chacartegui ve diğ. (2011)'de gösterildiği gibi kullanılarak (5.14) eşitliğiyle tahmin edilmektedir:

$$T_e = T_i \left[ 1 - \eta_{TD} \left( 1 - \left( \frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{z(y-1)}{1+z(y-1)}} \right) \right] \quad (5.14)$$

Burada,  $\gamma=c_p/c_v$  politropik genleşme faktörü ve  $z$  sıkıştırılabilirlik faktörüdür.

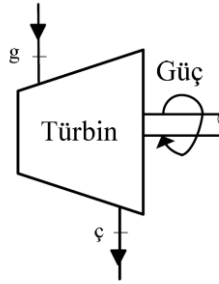
Aynı zamanda, güneş enerjisi kullanılması sebebiyle türbin giriş sıcaklığındaki değişim ve türbin giriş nozulündeki basınç düşüşü cihaz tarafından kabul edilen kütle akışını sınırlamaktadır. Stodola (1945) buhar türbini üzerindeki kütle akışı, sıcaklık ve basınç düşüşü arasında ilişkiyi (5.15) eşitliğiyle geliştirmiştir:

$$\dot{m}_t = \frac{K}{\sqrt{T_g}} \sqrt{P_g^2 + P_\zeta^2} \quad (5.15)$$

Burada,  $K$  kütle akış katsayısını,  $T_g$  girişteki sıcaklığı,  $P_g$  girişteki basıncı ve  $P_\zeta$  çıkıştaki basıncı temsil etmektedir. Kütle akış katsayısı, her bir bağımsız jeotermal enerji santrali için literatüre göre hesaplanmıştır (Dixon ve diğ. 1995).

$$\eta_t = \frac{h_g - h_\zeta}{h_g - h_{\zeta,i}} \quad (5.16)$$

Türbin verimini (5.16) eşitliğiyle hesaplanır. Burada,  $h_{\zeta,i}$  ideal çıkıştaki entalpiyi göstermektedir.



**Şekil 5.5:** Türbin şeması

Türbinin ekserjetik verimi, türbinden elde edilen yararlı işin, elde edilebilecek en çok işe (tersinir) oranı olarak, (5.16) eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada,  $\dot{W}_t$  gerçek türbin gücüdür.  $\dot{W}_{t,tr}$  tersinir türbin gücüne eşittir.

$$\eta_{t,ex} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{t,tr}} \quad (5.16)$$

Jeotermal buhar türbinleri genellikle ıslak buhar koşullarında çalışır ve bu nedenle izentropik verimleri, genleşme işlemi sırasında buharda bulunan nem

miktarından etkilenir. Nem arttıkça türbin verimi düşer. Bu etki Baumann kuralında (DiPippo 2008) gösterildiği gibi kullanılarak ölçülebilir. Bu kurala göre ortalama %1'lik ilave nem türbin verimliliğinde yaklaşık %1 düşüşe yol açtığını öne sürülmüştür. Dolayısıyla, izentropik verim şöyle belirlenir:

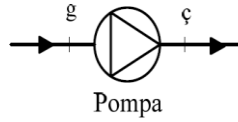
$$\eta_T = \eta_{TD} \left( \frac{X_g + X_\phi}{2} \right) \quad (5.17)$$

Eşitlikte  $\eta_{TD}$  kuru buhar koşullarında türbin verimliliğini,  $X_g$  buharın girişteki kuruluk derecesini ve  $X_\phi$  çıkıştaki kuruluk derecesini göstermektedir.

### 5.8 Pompa Analizi

Basit bir pompa şeması Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Pompadan çıkan akışkanın entalpisi, pompanın izentropik verim (5.18) eşitliğinden hesaplanmaktadır.

$$\eta_p = \frac{h_{\phi,i} - h_g}{h_\phi - h_g} \quad (5.18)$$



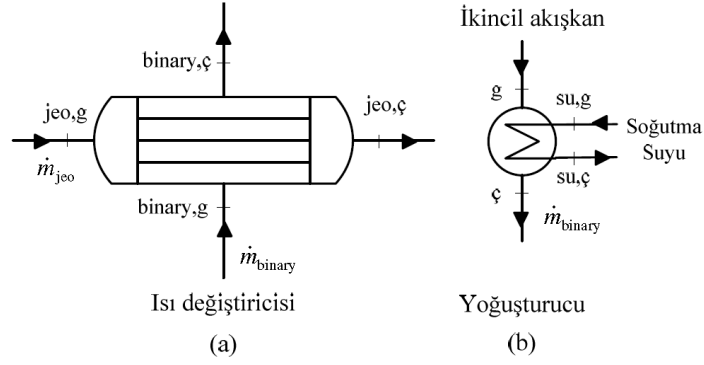
Şekil 5.6 : Pompa şeması

Pompanın ekserjetik verimi ise, (5.19) eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada,  $\dot{W}_p$  gerçek pompa gücü,  $\dot{W}_{p,tr}$  tersinir pompa gücüne eşittir.

$$\eta_{p,ex} = \frac{\dot{W}_{p,tr}}{\dot{W}_p} \quad (5.19)$$

### 5.9 Isı Değiştiricisi ve Kondenser Analizi

Isı değiştiricisi ile su soğutmalı yoğuşturucunun şematik görünümü Şekil 5.7'de verilmiştir.



**şekil 5.7:** Isı değiştiricisi (a) ve yoğuşturucu (b) şeması

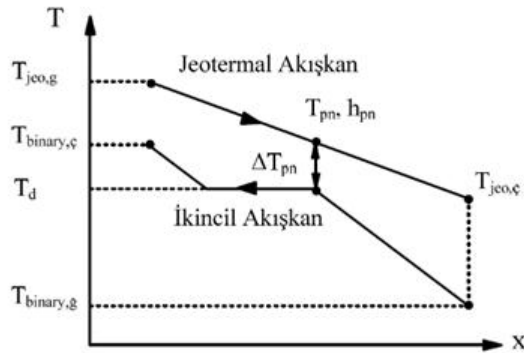
Isı değiştiricisi ve yoğuşturucu için jeotermal ve ikincil akışkanın sıcaklık değişim işlemi ise (5.20), (5.21) eşitliklerinde ve sıcaklık farkı da (5.22) eşitliğinde gösterilmektedir.

$$\dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{pn}) = \dot{m}_{binary}(h_{binary,\zeta} - h_{binary,f}) \quad (5.20)$$

$$\dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{pn}) = \dot{m}_{binary}(h_{binary,\zeta} - h_{binary,f}) \quad (5.21)$$

$$T_{pn} = T_d + \Delta T_{pn} \quad (5.22)$$

Burada  $h_{jeo,g}$  ve  $h_{jeo,\zeta}$  sırasıyla, jeotermal akışkanın ısı değiştiricisine girişinde ve çıkışındaki entalpisidir.  $h_{pn}$ , jeotermal akışkanın pinch noktası sıcaklığındaki entalpisidir.  $h_{binary,f}$ , ikincil akışkanın doyma sıcaklığındaki doymuş sıvı entalpisidir.  $h_{binary,g}$  ve  $h_{binary,\zeta}$  ise sırasıyla, ikincil akışkanın ısı değiştiricisine girişinde ve çıkışındaki entalpisidir.



**şekil 5.8:** Isı değiştiricisi için jeotermal ve ikincil akışkanın sıcaklık değişimi

Yoğuşturucu için ise enerjinin korunumu ilkesi göre uygulanırsa, (5.23) eşitliği elde edilmektedir. Burada  $\dot{m}_{su}$  ve  $\dot{m}_{binary}$ , sırasıyla soğutma suyunun ve ikincil akışkanın kütleli debileridir.

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{su}(h_{su,\zeta} - h_{su,g}) = \dot{m}_{binary}(h_g - h_\zeta) \quad (5.23)$$

Isı değiştiricisi (evaporatör ve yoğuşturucu) için ekserjetik verim ise, soğuk akışın ekserjisindeki artışı, sıcak akışın ekserjisindeki azalışa oranlanmasıyla elde edilmektedir (Wark 1995).

$$\eta_{ex,ID,K} = \frac{(\dot{X}_\zeta - \dot{X}_g)_{soğuk}}{(\dot{X}_g - \dot{X}_\zeta)_{sıcak}} \quad (5.24)$$

(5.24) numaralı eşitlikte soğuk ve sıcak indisler, sırasıyla soğuk ve sıcak akışkanı göstermektedir. Eşitlikte pay ve payda arasındaki fark, ısı değiştiricisi ve kondenser için ekserji kaybını ifade etmektedir. Kondenserde sıcak akışkanın ekserjisindeki azalma, santraldeki toplam ekserji kayıpları içinde direkt olarak değerlendirilmektedir (Kanoğlu ve Bolattürk 2008).

Jeotermal güç santrallerinin enerji verimi (5.25) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir:

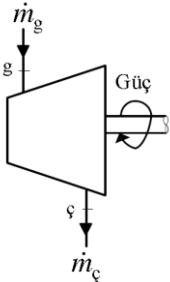
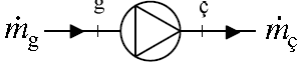
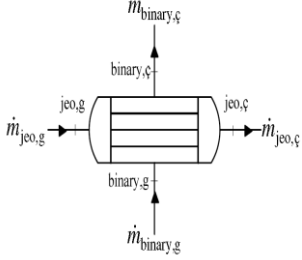
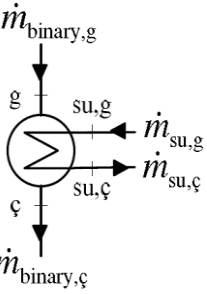
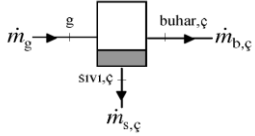

$$\eta_{th,1} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{jeo}(h_{jeo} - h_o)} \quad (5.25)$$

Paydadaki kısım güç santraline giren jeotermalin enerjisidir. Burada,  $h_{jeo}$  jeotermal akışkanın kuyu basındaki entalpisidir. Jeotermal bir güç santralinde, gerçek ısı giriği (5.26) eşitliğindeki ısı giriğiden daha azdır. Bu sebeple, ısı verim bir başka tanıma göre üretilen elektriğin giren ısıya oranı olarak,

$$\eta_{th,2} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{jeo,\zeta})} \quad (5.26)$$

Jeotermal güç santrallerinin üniteleri için kütle, enerji ve ekserji denklemleri Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.4:** Santral üniteleri için kütle, enerji ve ekserji denklemleri

Üniteler	Kütle Denklemleri	Enerji Denklemleri	Ekserji Denklemleri
 <p><b>Şekil 5.9 :</b> Türbin</p>	$\dot{m}_c = \dot{m}_g = \dot{m}$	$\eta_t = \frac{h_g - h_c}{h_g - h_{c,i}}$ $\dot{W}_t = \dot{m}(h_g - h_c)$	$\dot{W}_{t,tr} = \dot{m}(h_g - h_c) - T_o(s_g - s_c)$ $\dot{X}_t = (\dot{X}_g - \dot{X}_c) - \dot{W}_t$ $\eta_{t,ex} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{t,tr}}$
 <p><b>Şekil 5.10 :</b> Pompa</p>	$\dot{m}_c = \dot{m}_g = \dot{m}$	$\eta_p = \frac{h_g - h_{c,i}}{h_g - h_c}$ $\dot{W}_p = \dot{m}(h_g - h_c)$	$\dot{W}_{p,tr} = \dot{m}(h_c - h_g - T_o(s_c - s_g))$ $\dot{X}_p = \dot{W}_p - (\dot{X}_c - \dot{X}_g)$ $\eta_{t,ex} = \frac{\dot{W}_{p,tr}}{\dot{W}_p}$
 <p><b>Şekil 5.11 :</b> Eşanjör</p>	$\dot{m}_{jeo,g} = \dot{m}_{jeo,c} = \dot{m}_{jeo}$ $\dot{m}_{binary,g} = \dot{m}_{binary,c} = \dot{m}_{binary}$ ORÇ için; $\dot{m} = \dot{m}_{izobütan}$	$\dot{Q}_{ID} = \dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{jeo,c})$ $\dot{Q}_{ID} = \dot{m}_{binary}(h_{binary,c} - h_{binary,g})$	$\dot{X}_{ID} = (\dot{X}_{jeo,g} + \dot{X}_{binary,g}) - (\dot{X}_{jeo,c} + \dot{X}_{binary,c})$ $\eta_{ex,ID,K} = \frac{(\dot{X}_c - \dot{X}_g)_{soğuk}}{(\dot{X}_g - \dot{X}_c)_{sıcak}}$
 <p><b>Şekil 5.12:</b> Kondenser</p>	$\dot{m}_c = \dot{m}_g = \dot{m}$ $\dot{m}_{c,su} = \dot{m}_{g,su} = \dot{m}_{su}$	$\dot{Q}_K = \dot{m}(h_g - h_c)$ $\dot{Q}_K = \dot{m}_{su}(h_{su,c} - h_{su,g})$	$\dot{X}_K = (\dot{X}_g - \dot{X}_c)$ $\eta_{ex,ID,K} = \frac{(\dot{X}_{c,su} - \dot{X}_{g,su})}{(\dot{X}_c - \dot{X}_g)}$
 <p><b>Şekil 5.13:</b> Ayrıştırıcı</p>	$\dot{m}_g = \dot{m}_{b,c} + \dot{m}_{s,c}$	$\dot{m}_g h_g = \dot{m}_{b,c} h_{b,c} + \dot{m}_{s,c} h_{s,c}$	$\dot{X}_S = (\dot{X}_g - (\dot{X}_{siv1,c} + \dot{X}_{siv1,g}))$
 <p><b>Şekil 5.14:</b> Flaşlama ünitesi</p>	$\dot{m}_c = \dot{m}_g = \dot{m}$	$\dot{m}_g h_g = \dot{m}_c h_c$	$\dot{X}_S = \dot{X}_g - \dot{X}_c = T_o(s_c - s_g)$

Jeotermal akışkanın ekserjisi santrale giren ekserji girdisi olmak üzere, jeotermal güç santralinin ekserji verimi (5.27) eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\eta_{hx,1} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{X}_g} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{jeo}(h_{jeo} - h_o - T_o(s_{jeo} - s_o))} \quad (5.27)$$

Çift akışkanlı çevrimler için ekserji verimleri, ısı değiştiricisinde jeotermal akışkanın ekserjisindeki azalma veya ikincil akışkanın ekserjisindeki artışı esas alınmasıyla (5.28) eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\eta_{hx,2} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{X}_{binary,\zeta} - \dot{X}_{binary,g}} \quad (5.28)$$

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki bölümde bahsedilen güç çevrimleri (hibrit tek flaşlı, çift flaşlı, çift akışkanlı) teknik olarak incelenmiş, sayısal veriler tablo ve grafiklerle gösterilmiştir.

Termodinamik analizlere göre incelenen çevrimlerin, işletme ve yatırım maliyetlerinin dikkate alındığı ekonomik analizler de belirtilmiştir. Ekonomik analizler için gerekli olan maliyet değerleri ise literatürde yer alan çalışmalardan sağlanmıştır.

### 6.1 Model Doğrulaması

Çevrimlerin optimizasyonu için formüller ve kabuller kullanılarak termodinamik özellik fonksiyonlarını içeren EES programı (Engineering Equation Solver) kullanılmıştır. Önerilen jeotermal model, literatürde bildirilen veriler ve Denizli iline ait veriler kullanılarak doğrulanmıştır.

Tek flaşlı elektrik santrali, Dieing/Endonezya'da bulunan tek flaşlı enerji santralinin ekserji analizini ve optimizasyonunu geliştiren Pambudi ve diğ. (2012) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri güç çıkışı ve ikinci kanunun verimliliği sırasıyla 21,71 MW ve %36,48'dir. Mevcut model sonuçlarına göre güç çıkışı 21,97 MW ve ikinci kanun verimliliği %36,93'tür.

Çift flaşlı elektrik santrali içinde İran'ın Sabalan kentindeki bir santralin analizini geliştiren Jalilinasrabady ve diğ. (2012) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 49,78 MW'lık bir güç çıkışı ve %43,35'lik bir ekserji verimliliği elde ettikleri görülmüştür. Önerilen modelde ise güç çıkışı 52,6 MW ve ikinci kanun verimliliği ise %45,79 olarak görülmüştür.

Bu bağlamda, tek flaşlı elektrik santrali güç çıkışında %1,18, ikinci kanun kanun verimliliğinde ise %0,45 oranında hata gösterirken, çift flaşlı model, literatürdeki örnekleriyle karşılaştırıldığında güç çıkışında %5,36 ve ikinci kanun



verimliliğinde ise %2,4 hatalı sonuç vermiştir. Burada tarif edilen model ile literatürden elde edilenler arasındaki temel farkların kullanılan türbin modeli olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Angung ve Jalilinasrabady 'nin çalışması sabit izentropik verimleri dikkate alarak türbini analiz ederken, bu çalışmada bunun yerine nemin türbin üzerindeki etkisini değerlendirmek için Bauman kuralı göz önünde bulundurulmuştur.

Karşılaştırmanın temelini “oluşturmak için, yalnız jeotermal enerji santrallerinin hem tek ve hem de çift flaşlı çalışma koşulları, ayırma basıncı bakımından optimize edilmiştir. Ayırma basıncı sistemdeki jeotermal akışkan miktarını, ayırıcıda üretilen buharı (buhar kütle debisini), türbin girişindeki sıcaklık ve basıncı optimize ettiğinden, santralin güç çıkışı rezervuar koşullarına göre maksimize edilmektedir.

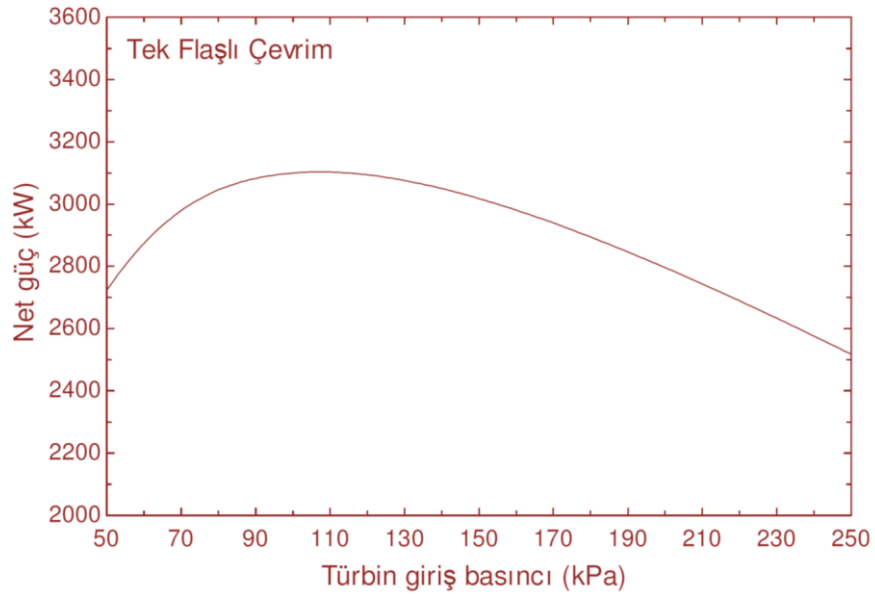
İki flaşlı santrallerde elde edilen ilave güç, ikinci ayırma işleminde üretilen ilave buhardan kaynaklanmaktadır. Bu durumda, çift flaşlı enerji santrallerinde, rezervuar koşullarına bağlı olarak, tek flaşlı enerji santraline kıyasla %14–20 ilave güç elde edilebilmektedir.

## **6.2 Tek Flaşlı Hibrit Sistem**

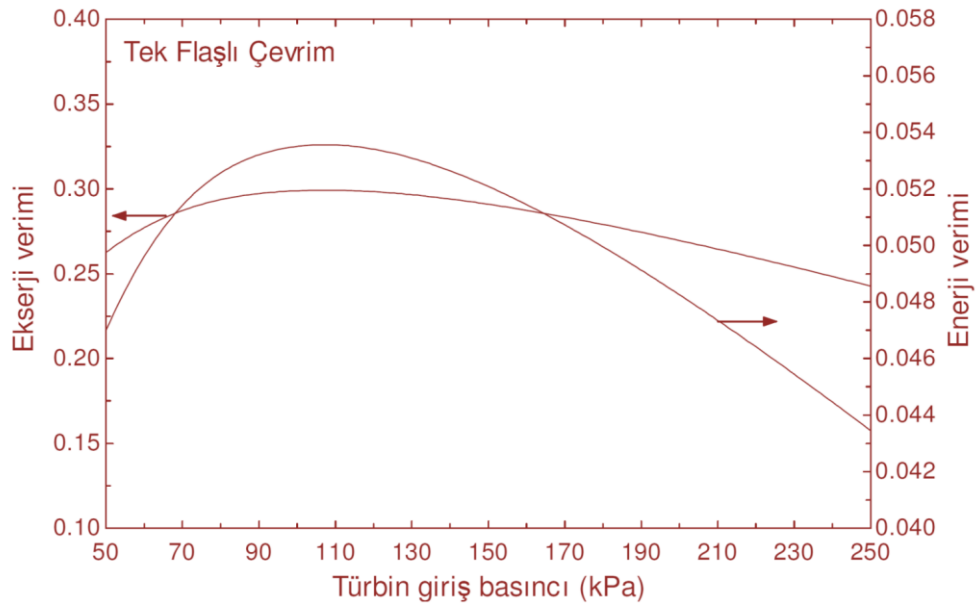
Tek flaşlı santral (bkz. Şekil 5.1) için türbin giriş basıncının net güce, enerji ve ekserji verimlerine etkisi Şekil 6.1 ve 6.2’de gösterilmektedir. Tek flaşlı hibrit şemadaki güneş enerjisi ısısı, jeotermal enerji santraline (bkz. Şekil 5.1) bir ısı eşanjörü (H.X 1) ile transfer edilmektedir. Eşanjör (H.X 2), ayırma işleminde üretilen buharı kızdırır. Tek flaşlı hibrit sistemin Denizli rezervuar koşullarına göre parametre sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Tek flaşlı hibrit şema sonuçları

Parametreler	Tek flaşlı enerji santrali				İlave güç üretimi durumunda				Jeotermal akışkan debisinin azaltılması durumunda			
	KD-42	KD-23D	R-1A	KD-R2	KD-42	KD-23D	R-1A	KD-R2	KD-42	KD-23D	R-1A	KD-R2
Ayrışma sıcaklığı (°C)	138,8	163	123,7	150,6	139,3	167,6	129,2	158,5	179,7	188,7	123,7	185
Ayrışma basıncı (bar)	3,49	6,67	2,22	4,82	3,54	7,47	2,63	5,95	9,95	12,19	2,22	11,22
Güç çıkışı (kW)	8237	14689	5915	10308	10818	18434	7900	13050	8237	14689	5915	10308
Buhar debisi (kg/s)	20,24	30,49	16,71	23,18	20,15	29,6	15,75	21,86	-	-	-	-
Jeotermal akışkan debisi (kg/s)	95,77	95,44	96,22	95,76	-	-	-	-	89,44	77,53	96,18	83,71
İkinci kanun verimliliği (%)	32,41	38,83	30,33	35,99	35,84	41,78	33,95	38,88	32,71	43,95	30,33	38,27
Güneş enerjisi toplama alanı (m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	15000	19600	12200	15000	4300	7900	-	5500

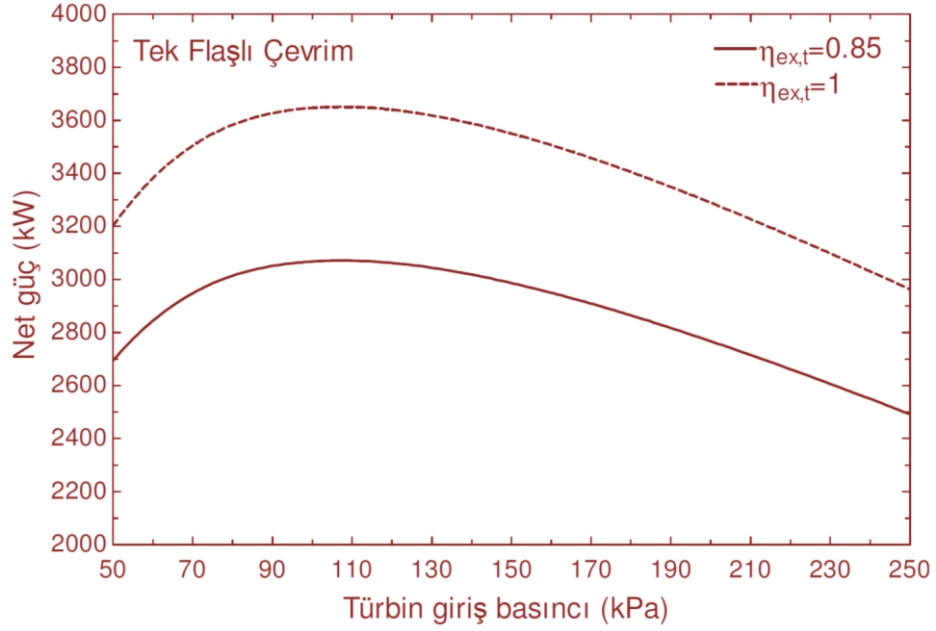
**Şekil 6.1 :** Tek flaşlı santral için türbin giriş basıncının net güce etkisi

Birim ısı döngü başına eşanjör-1 tarafından sağlanan elektrik gücü, güneş enerjisi ısı mevcut olduğunda, basitlik açısından sadece rezervuar koşulları hesaba katılarak değerlendirilmiştir. Eşanjör-1’de alınan güneş enerjisinin, kızdırma işleminde kWth başına 0,23 kWe daha fazla ilave güç ürettiği görülmektedir. Güneş enerjisinden sağlanan ısı gücün kızdırma işlemine verilmesi, türbin genişlemesinde buhar kalitesini yükselterek türbin verimini artırmaktadır. Eşanjör-1’de sağlanan her bir kWth, buhar sıcaklığını 0,012 °C arttırmaktadır. Eşanjör-1 buhar akışını 320 °C'a ulaşana kadar kızdırabilir, bu değer buhar sıcaklığı sınırına karşılık gelmektedir.



**Şekil 6.2:** Tek flaşlı santral için türbin giriş basıncının enerji ve ekserji verimine etkisi

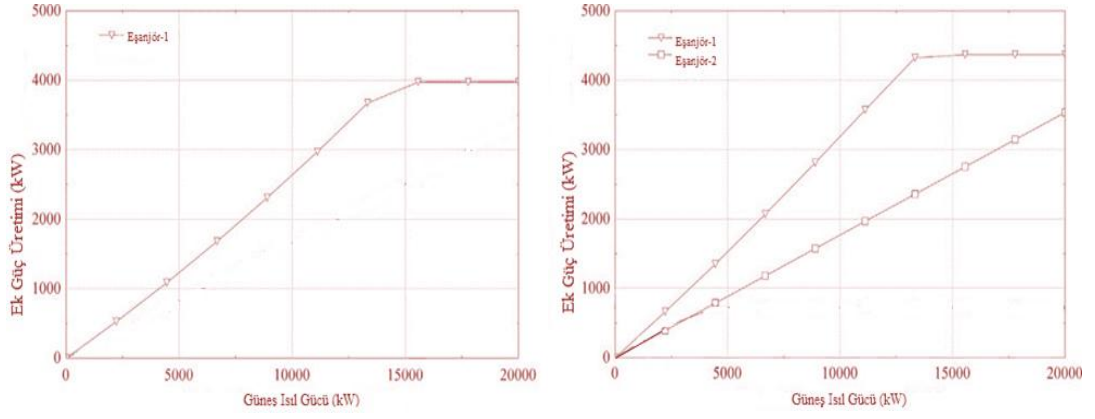
Tek flaşlı santralin ekserjiye dayalı optimizasyonunda türbin giriş basınçlarına göre net güç ve verimlerinin değişimleri Şekil 6.3'te görülmektedir. Ekserjiye dayalı optimizasyonda, türbinin ısı verimi yerine ekserjetik verim kullanılmış olup, ekserjetik verimler %85 ve %100 olarak alınmıştır. Diyagramlardan görüleceği üzere, enerjiye dayalı optimizasyonda elde edilen uygun değer basınç değerleri, ekserjetik optimizasyonda bulunan değerlerle paralellik göstermektedir. Ekserjetik verim arttıkça net güç ve ısı verim değerlerinde artış görülmektedir.



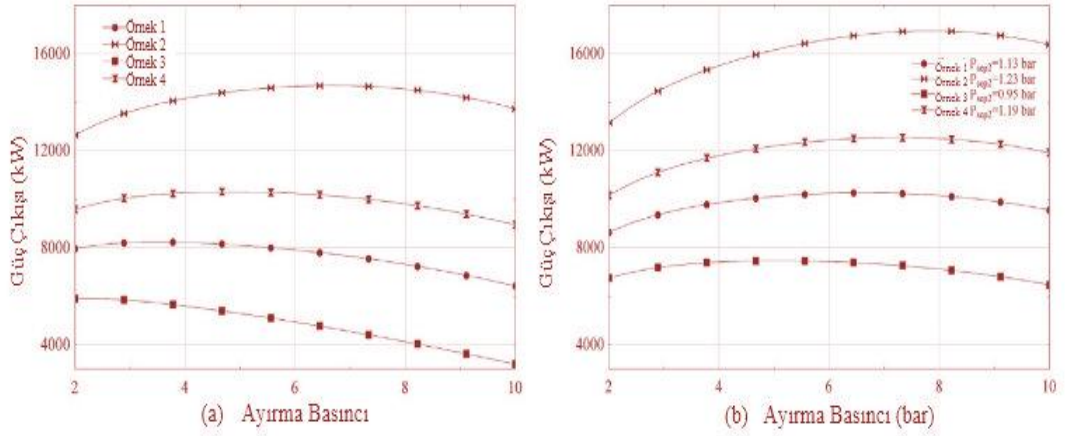
**Şekil 6.3:** Tek flaşlı santral için net gücün ekserjiye göre optimizasyonu

### 6.3 Çift Flaşlı Hibrit Sistem

Şekil 5.2'de şeması bulunan çift flaşlı hibrit enerji santralinin 2 adet ısı eşanjörü vardır. Eşanjör-1 buhar akışını kızdırmak için kullanılırken, Eşanjör-2 ise ikinci flaş ayırıcısından çıkan akışkandan ilave buhar üretmektedir. Bunun yanı sıra, Eşanjör-1 sağlanan güneş enerjisinden sadece 0,16 kWe/kWth güç üretmektedir, bu da sisteme 0,00035 kg/s ilave buhar artışı sağlamaktadır. Tek flaşlı sistem için daha önce elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla, çift flaşlı hibrit santralin her bir ısı eşanjörünün performansı, tek flaşlı sisteminin analizine benzer şekilde, rezervuar koşulları göz önüne alınarak, güneş enerjisi ısıl gücü girdisinin bir fonksiyonu olarak ilave güç üretimi açısından analiz edilmiştir. Analizin sonuçları, Şekil 6.7 'de gösterilmiştir; şekle göre en yüksek güç üretim hızını eşanjör-1 sunmakta ve verilen güneş enerjisinden 0,29 kWe/kWth üretmektedir. Eşanjör 2 ve eşanjör 3 benzer şekilde sırasıyla 0,17 kWe ve 0,19 kWe enerji üretim hızı göstermektedir. Tek flaşlı ve çift flaşlı şemaların eşanjör performansı arasındaki fark esas olarak buhar akış hızları ve ısı eşanjörü girişlerindeki sıcaklıklarla ilgilidir. Daha önce bahsedildiği gibi, kızdırma işleminde bir sıcaklık sınırı vardır.



**Şekil 6.4:** Tek flaşlı ve çift flaşlı santral eşanjörleri ile güneş enerjisi ısıl gücünün fonksiyonu olarak ilave güç çıkışı.



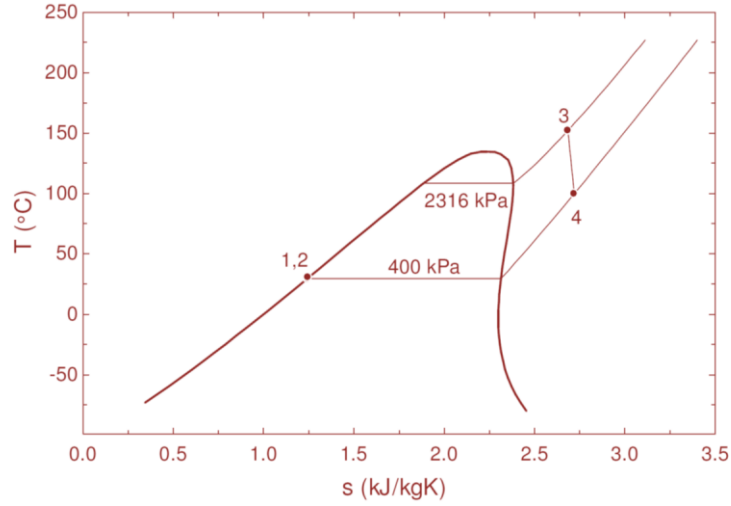
**Şekil 6.5:** Tek flaşlı elektrik santrali (a) ve çift flaşlı elektrik santrali (b) için ayırma basıncının bir fonksiyonu olarak rezervuarın güç çıkışı.

Ulaşılabilen maksimum kızdırma sıcaklıkları, buhar giriş özellikleri ile verilmiştir; Eşanjör 1 girişte daha yüksek bir buhar sıcaklığı sunduğundan, bu, buharın cihazın çıkışında daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasını sağlamaktadır. Eşanjör 2 tarafından üretilen ilave buhar, sağlanan enerji arttıkça sürekli artış göstermektedir. Yüksek basınçlı türbin, kızdırılmış buhar 7,63 barlık bir basınçta 270 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara ulaştığında kuru buhar koşullarında çalışır. Bu koşullar altında, türbin çıkışındaki buhar doymuş buhardır ve türbin içerisindeki genleşme (5.14) numaralı eşitlikte belirtildiği şekilde modellenmiştir. 270 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda türbin verimliliğinde bir süreksizlik meydana getirir. Bu sıcaklığın üzerindeki izentropik verim, literatürde görülen jeotermal türbinlerin normal değerleri ile uyumlu şekilde %85'in bir miktar üzerine çıkar (Dipippo 2008).

## 6.4 Çift Akışkanlı Jeotermal Güç Santrali

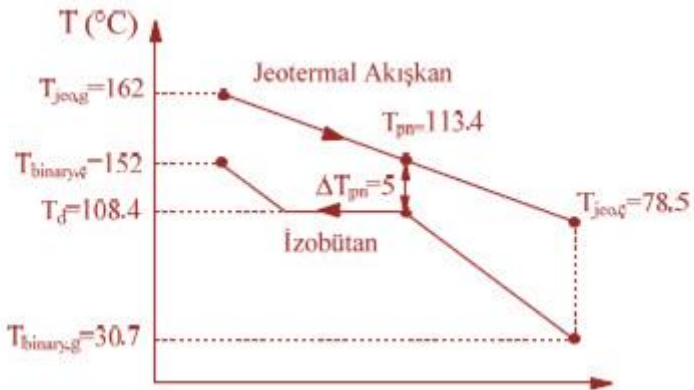
Çift akışkanlı santralde, ikincil akışkan olarak izobütan kullanılmıştır. İzobütanın kritik basıncı ve sıcaklığı sırasıyla, 3640 kPa ve 134,7 °C'dir (Çengel ve Boles 2008). Optimum türbin giriş basıncı Şekil (6.9)'a göre 2316 kPa olduğu görülmüştür.

Şekil (6.9)'a göre türbin çıkışında ikincil akışkan kızgın buhar fazında çıkmaktadır. Türbin çıkışında kızgın buhar fazının elde edilmesi, çift akışkanlı çevrimler için uygun bir durumdur.



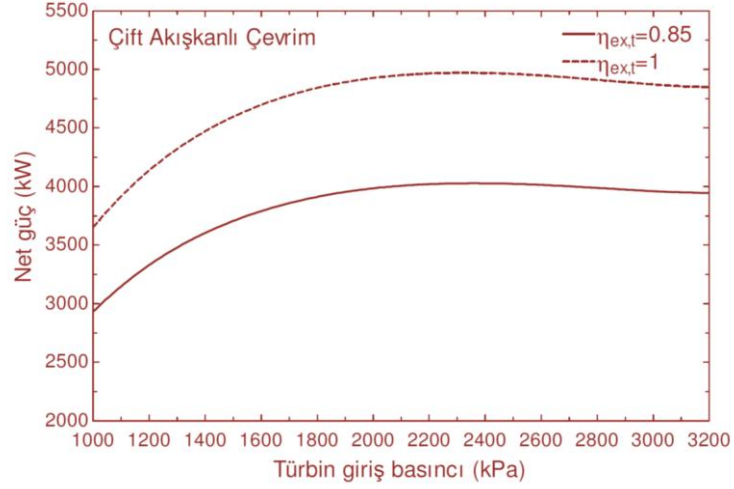
Şekil 6.6: Çift akışkanlı santral için T-s diyagramı

İkincil akışkanın ısı değiştiricisine giriş ve çıkış sıcaklıkları Şekil 6.10'da görülmekte olup, sırasıyla 30,7 ve 152 °C olduğu görülmüştür. Geri basma sıcaklığı ise 78,5 °C değerinde olduğu da görülmüştür.



Şekil 6.7: Çift akışkanlı santralin ısı değiştiricisindeki sıcaklık değişimi

Çift akışkanlı santralin ekserjiye dayalı optimizasyonunda türbin giriş basınçlarına göre net güç ve verimlerinin değişimleri Şekil 6.11’de görülmektedir.



**Şekil 6.8:** Çift akışkanlı santral için net gücün ekserjiye göre optimizasyonu

Türbindeki ekserji kaybı, toplam ekserji kaybının %7'sini oluşturmaktadır. Giren ekserjinin %59'u santralin ünitelerinde kaybolmakta, %41'i güce dönüşmektedir. Reenjeksiyon ve ısı değiştiricisinde %17'lik ekserji kaybı meydana gelmektedir. Kondenserde ise %13 değerinde kayıp oluşmakta olup, bu değer makul sınırlardadır.

Tüm santraller için enerji ve ekserjiye dayalı optimizasyonlar sonucu elde edilen optimum türbin giriş basınçları ve net güçleri Tablo 6.2'de gösterilmektedir.

**Tablo 6.2:** Enerji ve ekserjiye dayalı optimizasyonlar ile santrallerden elde edilen optimum değerler

Santraller	Enerjiye dayalı optimizasyon		Ekserjiye dayalı optimizasyon			
	Türbin giriş basıncı (kPa)	Net güç (kW)	Türbin giriş basıncı (kPa)	Net güç (kW)	Türbin giriş basıncı (kPa)	Net güç (kW)
			$\eta_{ex,t}=0.85$		$\eta_{ex,t}=1$	
Tek flaşlı santral	102,6	3102	102,6	3070	102,6	3650
Çift flaşlı santral	205,3	3991	211,1	3948	211,1	4693
Çift akışkanlı santral	2316	4184	2389	4027	2389	4970

**Tablo 6.3:** Denizli için çevrimlerin optimum türbin giriş basınçlarına göre enerjiye dayalı net güçleri, enerji ve ekserjetik verimleri

<b>Çevrim Türleri</b>	<b>Optimum Türbin Giriş Basıncı (kPa)</b>	<b>Net Güç (kW)</b>	<b>Enerji verimi (%)</b>	<b>Ekserji verimi (%)</b>
Tek flaşlı	102,6	3102	5,4	29,9
Çift flaşlı	205,3	3991	6,9	38,5
Çift akışkanlı	2316	4184	7,2	40,3

## 6.5 Yıllık Performans

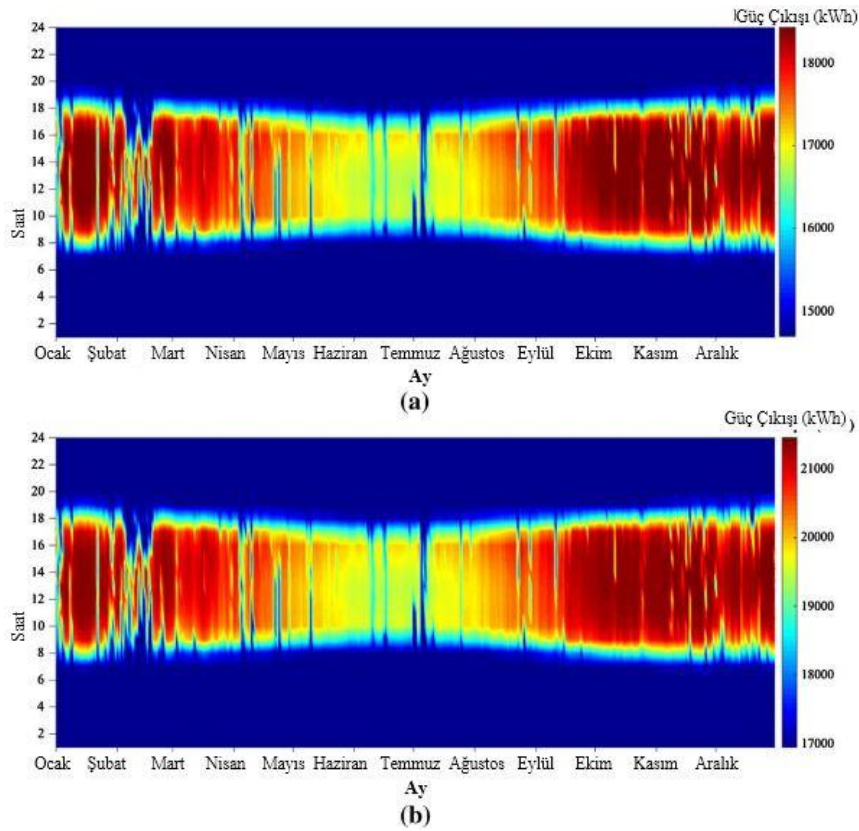
Güneş enerjili ve jeotermal enerjili hibrit santrallerin performansını değerlendirmek amacıyla, Denizli saatlik meteorolojik verileri dikkate alınarak bir geçiş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Denizli'deki yıllık toplam doğrudan normal ışınım (DNI) 1591 kWh/m<sup>2</sup>-yıl'ın üzerindedir. Jeotermal akış için, rezervuar koşullarının yıl boyunca çok az düzeyde değişim göstermesi nedeniyle, belli bir düzeyde kaldığı varsayıldı. Güneş enerji sahası, ısıl enerji depolama sistemi içermemektedir, bunun sebebi ilave maliyetler ve ayrıca, güç dağıtımının (elektrik şebekesinin beklenen talebini istenen minimum değişkenlikle sağlayabilen güç üretimi olarak anlaşılabilir) ana yük koşullarını üretebilen güneş-jeotermal hibrit sisteminin birlikte kullanımı ile elde edilebilmesidir.

### 6.5.1 İlave Güç Üretim Durumu

Saatlik simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, Şekil 6.12 'de gösterilmektedir. Lacivert bölgeler sadece jeotermal enerji santrallerindeki ana güç üretimini temsil etmektedir; Şekil 6.12 (a)'da tek flaşlı ve (b)'de çift flaşlı yapılar gösterilmiştir ve bunlar sırasıyla 14,68 MW ve 16,94 MW'a karşılık gelmektedir. Her iki sistemin de en iyi performansı, ortalama güç çıkışının sırasıyla 17,53 MW ve 20,15 MW'a ulaştığı ilkbahar döneminde gözlenmektedir. Bununla birlikte, sonbahar boyunca, hibrit tek flaşlı santral için ortalama elektrik üretimi 16,71 MW, hibrit çift flaşlı santral için ise 19,23 MW olmak üzere daha düşük bir performans elde edilmektedir. Bu nedenle, güneş enerjisinin entegrasyonu, sadece jeotermal elektrik



santralleri ile karşılaştırıldığında, tek flaşlı santrallerde yıllık üretimin yaklaşık %7 ve çift flaşlı sistemlerinde yaklaşık %9 artmasını sağlamaktadır.



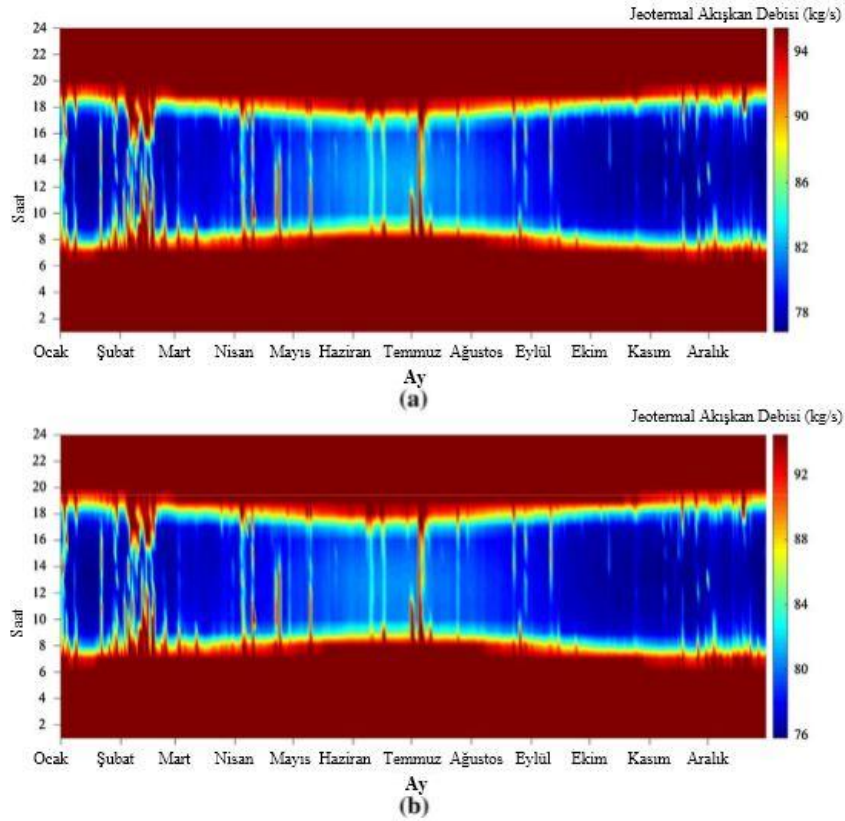
**Şekil 6.9:** İlave güç üretme durumunda güneş enerjisi ve jeotermal enerjili hibrit santrallerin yıllık performansı; (a) tek flaşlı, (b) çift flaşlı (Cardemil ve diğ. 2016).

### 6.5.2 Jeotermal Akışkan Debisini Azaltma Durumu

Jeotermal akışkan debisini azaltmak amacıyla hibrit santrallerin yıllık performansları saatlik simülasyonlar da gösterilmiştir. Şekil 6.13'te gösterildiği gibi tek flaşlı hibrit santralin sonuçları ve çift flaşlı hibrit santralin sonuçları gösterilmektedir. Şekil 6.13'teki kırmızı katman sadece jeotermal enerjiyle üretim yapan şemalardaki akış tüketimini, tek flaşlı santraller için 95,43 kg/s ve çift flaşlı santraller için 94,42 kg/s olarak göstermektedir. Güç çıkışının sabit olduğu düşünüldüğünde, jeotermal akışkan tüketimi, tek ve çift flaşlı santraller için sırasıyla 76,84 kg/s ve 76,43 kg/s'ye kadar düşebilmektedir.

Mevsimsel ortalamalarla ilgili olarak, en iyi performans ilkbaharda görülmektedir; debi azaltma işleminin yalnızca jeotermal enerji ile üretim yapan

şemalardaki orijinal tüketimin %16'sına karşılık geldiği görülmektedir. Bu arada, yıllık tüketim her iki sistem için de orijinal değer in yaklaşık %7,5'ine düşürülmüştür.



**Şekil 6.10:** Hibrit santrallerinin jeotermal akışkan debisi değişiminde yıllık performansı; (a) tek flaşlı, (b) çift flaşlı (Cardemil ve diğ. 2016).

## 6.6 Farklı İkincil Akışkanların Değerlendirilmesi

İkincil akışkan olarak literatürde ve uygulamalarda çoğunlukla izobütan kullanılmakta olup, bu çalışmada da kullanılmıştır. İzobütan akışkanının türbin çıkışında doyma eğrisinin daha dik olması, çıkış fazının kızgın buharda olmasını sağlamaktadır. Bu sebeple, çift akışkanlı çevrimler için en uygun ikincil akışkan izobütandır. Çift akışkanlı santral için, alternatif akışkanlarla ilgili optimum değerler Tablo 6.4'te görülmektedir. Çift akışkanlı santralde en iyi performans değerlerini izobütan sağlamaktadır. Çift akışkanlı santralde ikincil akışkan olarak izobütanın yerine n-pentan, R113 ve R114'ün kullanımıyla optimum türbin giriş basıncı düşmekte olup, net güçte ve verimlerde azalma meydana gelmektedir.

**Tablo 6.4:** Çift akışkanlı santralde kullanılan farklı ikincil akışkanların optimum değerleri (Ergün 2014)

Akışkan	Türbin Giriş	Kütleli Debi (kg/s)	Net Güç (kW)	Isıl Verim	Ekserjetik Verim (%)
İzobütan	2316	67,0	4184	7,2	40,3
n-pentan	605,3	58,4	3495	6,0	33,7
R113	486,8	100,5	2515	4,9	27,5
R114	1684	167,2	3638	6,3	35,1

Kondenser basıncı soğutma suyu giriş ve çıkış özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kondenser basıncı, izobütan ve n-pentan'ın kullanıldığı çevrimlerde sırasıyla 400 kPa ve 100 kPa, R114 ve R113'ün kullanıldığı çevrimlerde ise 100 kPa değerlerinde alınmaktadır.

## 6.7 Ekonomik Analiz

Jeotermal güç santrallerinde üretilen enerjinin maliyeti ve santrallerin geri ödeme süreleri Tablo 6.5, 6.6 ve 6.7'de gösterilmektedir. Hesaplamalarda sabit yıllık sermaye masrafları metodu kullanılmıştır.

**Tablo 6.5:** Denizli-Kızıldere bölgesi için maliyetler ve geri ödeme süreleri (Coşkun 2011).

Çevrim	Net Güç (kW)	Toplam Maliyet (M\$)	Birim Enerji Başına Düşen Maliyet (\$/kWh)	Geri Ödeme Süresi (Yıl)
Tek flaşlı çevrim	10866	23,67	0,0111	5,5
Çift flaşlı çevrim	13889	31,64	0,0116	5,8
Çift akışkanlı çevrim	16325	53,21	0,0165	8,3

Sonuçlardan görüleceği üzere, tüm bölgelerde kurulacak santraller arasında birim enerji maliyetleri ve geri ödeme süreleri bakımından en avantajlı olanı tek flaşlı çevrimdir. Tek flaşlı çevrimin birim tesis maliyetinin düşük olması sebebiyle enerji maliyeti ve geri ödeme süresi de düşük olmaktadır. Çalışılan bölgede tek flaşlı bir jeotermal güç santrali diğer çevrimlere göre daha az güç ürettiği göz önünde bulundurulmalıdır.

### 6.7.1 Jeotermal Güç Santrallerinin Maliyetlerini Etkileyen Faktörler

Kurulum maliyetleri, santralin kurulması esnasında oluşacak maliyetleri içermektedir. Bu maliyetler,

- İzin alma
- Arazi eldesi
- Çevresel
- Kuyu testleri
- Kamu işleri ve altyapı
- Bölge çalışmaları
- Ön fizibilite ve fizibilite raporlarından oluşmaktadır (Url-12 2009).

Bir jeotermal kuyunun delinmesi, delme adımları ile kuyu çevresinin yapımından kaynağın en üst noktasına kadar olan belirli aşamalardan meydana gelmektedir. Delme maliyetleri çoğunlukla kaynağın karakteristiklerine bağlıdır. Delme maliyetleri, diğer ekonomik parametrelerden de etkilenmektedir (Url-12 2009).

Jeotermal bir kuyunun delme maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden birisi kaynağın derinliğidir. Bununla birlikte kayanın yapısı, delme hızı, kuyunun çapı delme süresini etkilemektedir. Bu faktörlere göre, jeotermal bir kuyunun delinme süresi 25 günden 90 güne kadar değişebilmektedir. Makul olan süre ise ortalama 45 gündür (Coşkun 2011).

Jeotermal akışkanın bileşimi de başka bir önemli faktördür. Korozif jeotermal akışkan daha dirençli borular ve çimento kullanımına sebep olmaktadır. Boruların titanyum kaplanmasıyla kuyu maliyetlerinde önemli bir artış olmaktadır. Titanyum borularının maliyetleri ortalama birim uzunluk başına 1000 \$ civarındadır (Coşkun 2011).

Burada kuyu derinliğinin birimi “feet” olarak alınmaktadır. Delme maliyeti ise dolar cinsindedir. Ucuz kuyuların maliyetleri 1 milyon \$ civarında iken, pahalı kuyuların maliyetleri 8-9 milyon \$ civarındadır. Ortalama kuyu maliyetleri 2-5 milyon \$ arasında değişmektedir. Sonuç olarak, kaynağın karakteristik özellikleri kuyuların maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir (Coşkun 2011).

Kaynağın sıcaklığı, özellikle güç santrallerinin maliyetlerinde önemli bir parametre olarak görülmektedir. Güç santralleri, jeotermal akışkandan alınan ısının kullanımına göre optimize edilmektedir. Örneğin ısı değiştiricilerinin maliyetleri ve büyüklükleri kaynağın sıcaklığına göre belirlenmektedir. Kaynak sıcaklığı arttıkça; güç sisteminin verimi artmakta, ekipmanların özgül maliyetleri ise düşmektedir. Ayrıca, kaynak sıcaklığı santral tipinin seçimini de belirlemektedir. Yüksek sıcaklıklı kaynaklarda buharlı güç sistemleri kullanılmakta ve bu sistemlerin maliyetleri daha düşük olmaktadır. Buhar santrallerinde jeotermal akışkanın sıcaklığı azaldıkça özgül maliyetler artmaktadır. Binary sistemlerinin maliyetleri 175 °C'den daha düşük sıcaklıklarda, buharlı sistemlere göre karmaşık yapısına rağmen daha düşük olmaktadır. Binary sistemlerinin özgül maliyetleri sıcaklık düştükçe artmaktadır (Coşkun 2011).

### 6.7.2 Maliyet Tahminleri

Tek flaşlı sistemler için, santralin büyüklüğü arttıkça sermaye maliyetleri azalmaktadır.

**Tablo 6.6:** Tek flaşlı güç santralleri Tahmini maliyet (Coşkun 2011).

Santral Büyüklüğü	Tahmini Toplam Maliyet (\$/kW)
20 MW'lık tek flaşlı güç santrali	1540
50 MW'lık tek flaşlı güç santrali	1330

Tahmini maliyet değerlerine bölge kurulumu, kamu işleri, mekaniksel ve elektriksel kurulum işleri, yardımcı yüklerin temini dahil edilmiştir. Yüksek voltajlı dağıtım hatları bu maliyetlere dâhil değildir (Url-12 2009).

Standart organik Rankine çevrimli güç santrallerinin kapasiteleri 2 MW, 5 MW ve 10 MW'tır. Günümüzde en yüksek güce sahip santralin kapasitesi 10 MW'tır. Bunun sebebi, organik Rankine çevrimli güç santrallerinin gücü arttıkça çoklu ünitelerin kullanımına gereksinim olmaktadır. Bu durum, santralin ekonomisini etkilemektedir. Tablo 6.7'de Organik Rankine Çevrimli santrallerinin maliyetleri görülmektedir (Url-12 2009).

**Tablo 6.7:** ORÇ tahmini toplam maliyetleri (Coşkun 2011).

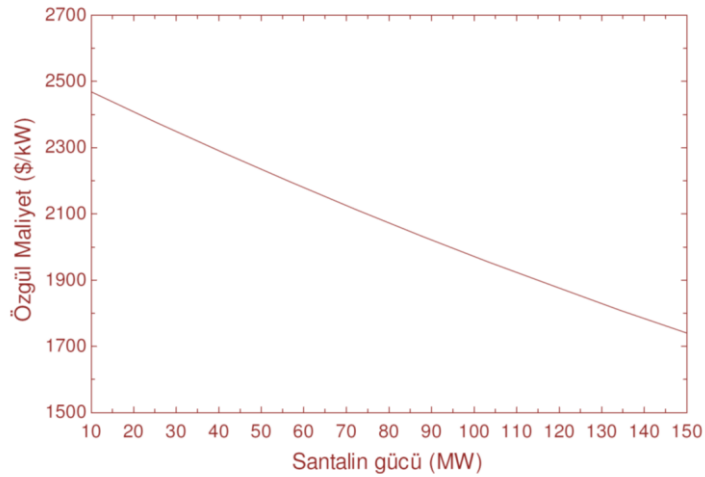
Santral Büyüklüğü	Tahmini Toplam Maliyet (\$/kW)
20 MW'lık güç santrali	2350
50 MW'lık güç santrali	2350

20 MW ve 50 MW güce sahip çift flaşlı santrallerin maliyetleri Tablo 6.8'de sunulmuştur.

**Tablo 6.8:** Çift flaşlı güç santralleri tahmini maliyetleri (Coşkun 2011).

Santral Büyüklüğü	Tahmini Toplam Maliyet (\$/kW)
20 MW'lık çift flaşlı güç santrali	1720
50 MW'lık çift flaşlı güç santrali	1470

Lovekin (2000) ise çalışmasında, büyük santrallerin termodinamiksel açıdan daha etkin olduğunu belirtmiştir. Bu durum, daha iyi bir santral tasarımıyla yüksek verim elde edileceğini göstermektedir. Orantılı olarak, mühendislik ve tasarım maliyetleri, büyük projeler için daha düşük olmaktadır (Coşkun 2011).



**Şekil 6.11:** Santralin özgül maliyetinin güce göre değişimi (Coşkun 2011).

### 6.7.3 Çalışma Maliyetleri

Çalışma maliyetleri, santralin çalışmasıyla ilgili tüm giderleri içermektedir. Literatürde, 40 adet personelin çalışacağı 50 MW'lık bir güç santralinde çalışma

maliyetinin 7 \$/MWh olacağı tahmin edilmektedir. Yeni santraller için işgücü gereksinimleri, tahmin edilenden daha düşük olabilmektedir.

Gallo'ya (2002) göre Glass dağı bölgesinde kurulabilecek iki tane 50 MW'lık flaşlı santraller için ihtiyaç olan işçi sayısı sırasıyla 23 ve 15 olarak belirtilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, mevcut bir güç santrali için işçi sayısının ortalama 0,52 işçi/MW olduğu tahmin edilmektedir. Bu veriler, santralin yapısına ve aktivitesine göre kayda değer bir şekilde değişiklik göstermektedir.

#### 6.7.4 Bakım Maliyetleri

Bakım maliyetleri, türbin, jeneratör gibi santral ekipmanlarının bakımı ile ilgilidir. Kaliforniya Yenilenebilir Teknoloji Pazarı ve Değerlendirme Kuruluşu (EPRI) 2001 yılında, güç santrallerinin yıllık bakım maliyetlerini, başlangıçtaki sermaye maliyetlerinin %5'i kadar olduğunu tahmin etmiştir. Başlangıç maliyetinin 1400 \$/kW olduğu bir santralin bakım maliyeti 9 \$/MWh olarak tahmin edilmektedir. Sonuç olarak, çalışma ve bakım maliyetleri; güç santralinin büyüklüğüne, kaynak ve bölge karakteristiklerine bağlıdır.

Sanyal (2004), çalışmasında 5 MW ile 150 MW arasında değişen güç kapasitelerine sahip güç santrallerini incelemiştir. Güç kapasitesinin, çalışma ve bakım maliyetlerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir. Güç kapasitesiyle çalışma ve bakım maliyetleri arasında deneysel (6.1) numaralı eşitlik elde etmiştir.

$$O \& M \text{ maliyet} = 2.e^{-0.0025(N-5)} \quad (6.1)$$

Burada; N (MW) ve O&M maliyet (\$/kW) terimleri sırasıyla, güç santralinin güç üretim kapasitesini ve çalışma, bakım maliyetlerini göstermektedir. Çalışma ve bakım maliyetleri, güç santralinin ömrü boyunca değişkenlik arz etmektedir (Sanyal 2004).

Bazı çalışmalarda, buharlı ve binary güç santrallerinin çalışma ve bakım maliyet değerlerinde farklılık ortaya konmuştur. Buharlı sistemlerin çalışma ve bakım maliyetleri binary sistemlerden biraz daha yüksektir. Literatürde, çalışma ve

bakım maliyetlerinin dağılımı detaylı olarak analiz edilmiştir. Bir güç santralının çalışma maliyetleri Tablo 6.9’da sınıflandırılmıştır.

Maliyetlerin dağılımındaki en fazla oran, buharla ilgili kısma aittir. Buhar maliyetleri; kuyular, buhar elde etme sistemleri, yol maliyetlerinden oluşmaktadır. Tablo 6.9’da gösterilen maliyetlere amortisman dâhil edilmemiştir (Coşkun 2011).

**Tablo 6.9:** Jeotermal güç santrallerinin çalışma maliyetlerinin dağılımı (Coşkun 2011).

<b>Maliyetler</b>	<b>Çalışma ve bakım maliyetlerinin yüzdesi</b>
İşçilik	% 8-32
Buhar	% 42-74
Kimyasal	% 1-15
Diğer	% 6-41



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hibrit güneş-jeotermal sistemleri, faydalı verimlilik açısından sadece jeotermal veya sadece güneş enerjisi sistemlerinden daha iyi performans gösterebileceği literatürde ve çalışmadaki veriler ile ortaya konmuştur.

Güneş tarlası tarafından sağlanan güneş enerjisi ısıl gücünün optimizasyonu, jeotermal akışkanı kızdırma ve buharlaştırma işlemlerinde güç üretimini arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, kızdırma işlemi, tek flaşlı ve çift flaşlı hibrit santraller için sırasıyla 0,23 kWe/kWth ve 0,29 kWe/kWth artırılması daha yüksek ilave güç çıkışı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, buharın sıcaklığının artırılması, ikinci kanun verimini artırmakta ve türbin verimini de iyileştirmektedir (Cardemil ve diğ. 2016).

Hibrit sistem rezervuar koşullarına bağlı olarak ikinci kanun verimini en üst düzeye çıkarırken %15-20 ilave güç çıkışı üretebilmektedir. Jeotermal enerjiyle üretim yapan santrallerde akışkan tüketimini, tek flaşlı santraller için 95,43 kg/s ve çift flaşlı santraller için 94,42 kg/s olarak göstermektedir. Güç çıkışının sabit olduğu düşünüldüğünde, jeotermal akışkan tüketimi, tek ve çift flaşlı santraller için sırasıyla 76,84 kg/s ve 76,43 kg/s'ye kadar düşebilmektedir (Cardemil ve diğ. 2016).

Jeotermal akışkan debisi, rezervuar koşullarına bağlı olarak %5'ten %19'a kadar düşürülebilmektedir. Bununla birlikte, jeotermal akışkan debisini azaltma stratejisi, 1250–1750 kJ/kg ve 2500-8000 kW gerçekleşmektedir; orta jeotermal rezervuar, düşük güneş enerjisi ısıl gücü ile maksimum ikinci kanun verimini bu aralıkta elde etmektedir (Cardemil ve diğ. 2016).

Sisteme güneş enerjisinin eklenerek, sadece jeotermal elektrik santralleri ile karşılaştırıldığında, tek flaşlı santrallerde yıllık üretimin yaklaşık %7 ve çift flaşlı sistemlerinde yaklaşık %9 artmasını sağlamaktadır (Cardemil ve diğ. 2016).

Jeotermal güç santrallerinde özellikle geri basma kuyularındaki kayıplar her zaman için dikkate alınmalıdır. Kayıpların en aza indirilmesi için bu ünitelerdeki atık ısıdan maksimum derecede faydalanılması gerekmektedir. Böylelikle santrallerin güç

Üretim kapasiteleri ve verimlerinde iyileşmeler sağlanabilir. Denizli bölgesi için incelen santralin ünitelerindeki meydana gelen enerji ve ekserji kayıpları incelenmiştir. İncelenen evrimler dikkate alındığı zaman, en yüksek ekserji kayıpları geri basma kuyusu, kondenser ve ısı değiştiricisi ünitelerinde meydana gelmektedir. Bu bölgedeki geri basma kuyularındaki ekserji kayıplarının %10-36 arasında değiştiği görülmektedir. Geri basma kuyularındaki en düşük ekserji kaybı çift flaşlı santralde görülürken, en yüksek ekserji kaybının tek flaşlı santralde olduğu görülmektedir. En yüksek ekserji kayıplarının geri basma kuyularında meydana gelmesi, jeotermal akışkanın yer altına gönderilmeden önce başka bir uygulamada kullanılmasının uygun olacağını göstermektedir.

Optimum koşulları sağlamak için daha düşük bir güneş tarlası alanı gerektiren ve hibrit tek flaşlı santralden daha yüksek ilave g ıkıı üreten çift flaşlı hibrit enerji santrali daha büyük fayda göstermektedir. Sabit güç çıktısı için de jeotermal akışkan tüketimi de azaltılabilmektedir.

Düşük sıcaklıktaki jeotermal akışkanlar, yüksek sıcaklıktaki güneş enerjisi ile ısıtılabilir. Güneş enerjisinin düşük kapasite faktör sorunu, jeotermal enerjinin yüksek kapasite faktörüyle telafi edilebilir.

Hibrit güneş-jeotermal sistemleri, faydalı verimlilik açısından bağımsız jeotermal veya güneş enerjisi sistemlerinden daha iyi performans gösterebilir. İyileştirme hibrit sistemlere bağlıdır.

Hibrit güneş-jeotermal sistemi, kurulumdan sonra kısa vadede bağımsız sistemden daha az rekabetçi olurken, bahsedilen avantajları nedeniyle uzun vadede maliyet açısından daha rekabetçi hale gelebilir. Tek ve çift flaşlı hibrit sistemler için sırasıyla 64 \$/MWh ve 56 \$/MWh gibi düşük maliyetlerde ilave güç sağlanması mümkün olduğu görülmüştür (Cardemil ve diğ. 2016).

Hibrit güneş-jeotermal santrallerinin birçok avantaja sahip olmasına rağmen, mevcut çalışmaların çoğu, enerji üretimi için pek çok proje tamamlanmadan kavramsal ve teorik konulara odaklanmaktadır. Bunda asıl sebep yüksek yatırım maliyeti olabilir.

Optimum koşulları sağlamak için daha düşük bir güneş tarlası alanı gerektiren ve hibrit tek flaşlı santralden daha yüksek ilave güç çıkışı üreten çift flaşlı hibrit enerji santrali daha büyük fayda göstermektedir. Jeotermal akışkan tüketimini azaltma da söz konusudur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hibridizasyonu ile enerji talebinin yoğun olduğu saatlerde arttırılabilen güç üretimi yanında, üretim kuyusundan çekilen jeotermal akışkan debisini azaltılabilmesi mümkün olduğu görülmüştür. Bu üretim kuyusunun kullanım ömrünün uzaması açısından çok önemlidir.

Güneş enerjili ve jeotermal enerjili hibrit sistemi, Türkiye enerji piyasası için, devletin koyduğu şartları karşılayan bir alternatif sunabileceği görülmektedir. Bu hibrit sistemler, ülkemizde var olan yenilenebilir enerji potansiyeli kullanımıyla, mevcut enerji kaynaklarını çevre dostu enerjiyi çeşitlendirmek için ilgi çekici bir fırsat oluşturduğu görülmektedir. Bu yönde yapılacak çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynaklarımızın ele alınmasıyla elde edilebilecek sonuçlar ülkemizin gelecekteki enerji vizyonunu ortaya koyması bakımından çok yararlı olacaktır.

## 8. KAYNAKLAR

Aksoy, N., “Türkiye’de Jeotermal Kaynaklardan Elektrik Üretimi”, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (17-20 Nisan 2019), İzmir, (2019).

Alvarenga, Y., Handal, S., and Recinos, M.: Solar Steam Booster in the Ahuachapán geothermal Field, GRC Transactions, 32, 395-400, (2008).

Al-Sulaiman FA., Energy and sizing analyses of parabolic trough solar collectorintegrated with steam and binary vapor cycles, 58:561–70, (2013).

Astolfi, M., Xodo, L., Romano, M.C., and Macchi, E.: Technical and Economic Analysis of a Solar–Geothermal Hybrid Plant Based on an Organic Rankine Cycle, Fuel & Energy, 40, 58-68, (2011).

Atalay, Ö., Jeotermal Sistemlerin Ekserji Analizi: Kızıldere Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2004).

Ayub, M., Mitsos, A., and Ghasemi, H.: Thermo-economic Analysis of a Hybrid Solar-binary geothermal Power Plant, Energy, 87, 326-335, (2015).

Bertani, R., Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report, Geothermics, 41, 1-2, (2012).

Boghossian, J.G., Dual-temperature Kalina Cycle for geothermal-solar Hybrid Power Systems, Massachusetts Institute of Technology, (2011).

Çakıcı, D. M., “Thermal Modeling of a Geothermal Powered Organic Rankine Cycle Integrated with Parabolic Trough Solar Collectors”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniveritesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, (2016).

Cardemil, J. M., Cortés, F., Díaz, A., & Escobar, R. Thermodynamic evaluation of solar-geothermal hybrid power plants in northern Chile. Energy Conversion and Management, 123, 348-361, (2016).

Cebeci, S.” Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim. Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, Uzmanlık Tezi, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara, (2017).

Çengel, Y. A., Boles, M.A. Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla, (Çeviri Editörü: Ali Pınarbaşı), Güven Bilimsel, 553-555, (2008).

Çoşkun, A.,” Türkiye’deki Jeotermal Kaynaklar için Güç Santrallerinin Termodinamik Analizi ve Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2011).

DiMarzio, G., Angelini, L., Price, W., Chin, C., and Harris, S.: The Triple Hybrid Power Plant: Integrating geothermal, Solar Photovoltaic and Solar Thermal Power Generation, Proceedings, World geothermal Congress 2015, Melbourne, Avustralya, (2015).

Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. 4th ed. New York, (2013).

Eney, S.L., and Rudisill, J.M.: Solar Energy Benefits Southeast Geysers geothermal Recharge Project, GRC transactions, 33, 119-124, (2009).

Ergün, A., “Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralının Termoekonomik Analizi” Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük, (2014).

Ghasemi, H., Sheu, E., Tizzanini, A., Paci, M., and Mitsos, A.: Hybrid Solar–geothermal Power Generation: Optimal Retrofitting, Applied Energy, 131, 158-170, (2014).

Greenhut, A.D., Tester, J.W., DiPippo, R., Field, A., Love, C., and Chad, K.N.: Solar-geothermal Hybrid Cycle Analysis for Low Enthalpy Solar and geothermal Resources, Proceedings, World geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia (2010).

Halaçoğlu, U.,” Kızıldere-II Jeotermal Enerji Santrali’ nin Performans Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2015).

Kondili, E., and Kaldellis, J.K.: Optimal Design of geothermal-solar Greenhouses for the Minimization of Fossil Fuel Consumption, Applied Thermal Engineering, 26, 905-915, (2006).

Lentz, A. ve Almanza, R.: Parabolic Troughs to Increase the geothermal Wells Flow Enthalpy, Solar Energy, 80, 1290-1295, (2006).

Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., and Yang, Y.: Comparison of geothermal with Solar and Wind Power Generation Systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 42,1464-1474, (2015).

Li, K., Liu, C., Chen, Y., Liu, G., & Chen, J. “Upgrading both Geothermal and Solar Energy” Stanford University, Stanford Geothermal Program, California, USA, (2016).

Livatyalı, H., Yıldırım, T. “Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisindeki gelişmeler”, *Mühendis ve Makina*, 53 (633), 16-20, (2011).

M. Wendel, S. Colle, J.M. Cardemil, F.M. Miller Metodologia para simulação transiente de una pequena central heliotérmica CBENS, (2010).

Manente, G., Field, R., Dipippo, R., Tester, J.W., Paci, M., and Rossi, N.: Hybrid Solar-geothermal Power Generation to Increase the Energy Production from a Binary geothermal Plant, *Proceedings, ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 109-119, (2011).

Mathur, P.N.: An Assessment of Solar-geothermal Hybrid System Concepts, U.S. DOE report, SAN-1101-14/1, (1979).

Miao, F.Q., Dayton, J.M., Lardi, P., and Andrawis, H.: Integrated geothermal & Solar Energy Conversion Technologies and WorleyParsons EcoNomics Approach, *GRC Transactions*, 33, 131-135, (2009).

Mir, I., Escobar, R., Vergara, J., and Bertrand, J.: Performance Analysis of a Hybrid Solar-geothermal Power Plant Cost Effective in Northern Chile, *Proceedings, World renewable energy congress, Linkoping, Sweden*, (2011).

Öztürk, H. K., Şanlı, G., Yılancı, A. “Parabolik oluk tipli güneş kolektörlerinin performans analizi” *Mühendis ve Makina*, 51 (609), 19-27, (2009).

Pelissier J.P., “China & Japan to lead global solar boom in 2015”, *Bloomberg*, (2015).

Peterseim, J.H., White, S., Tadros, A., and Hellwig, U.: Concentrating Solar Power Hybrid Plants – Enabling Cost Effective Synergies, *Renewable Energy*, 67, 178-185, (2014).

Price, P.H., and Kearney, D.: Reducing the Cost of Eenergy from Parabolic Trough Solar Power Plants, Proceedings, ASME 2003 International Solar Energy Conference, 591-599, (2003).

Sanyal, S.K., Cost of geothermal power and factors that affect it, proceedings. Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, California, 149-151, (2004).

Satman, A. 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 17-20 Nisan 2019/İzmir, (2019).

Serpen, U. “Jeotermal Enerjinin Türkiye ve Dünyada Kullanımı”, Jeotermal Enerji Semineri,435-447, (2017)

Tchanche, B. F., Lambrinos, Gr., Frangoudakis, A. and Papadakis, G., "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 3963–3979, (2011).

Tempesti, D., Manfrida, G., and Fiaschi, D.: Thermodynamic Analysis of Two Micro CHP Systems Operating with geothermal and Solar Energy, Applied Energy, 97, 609–617, (2012).

Url-1, <https://www.enerjiportali.com/jeotermal-nedir-jeotermal-enerji-nedir/>, 10 Mart 2019.

Url-2, <http://www.enther.com.tr/jeotermal-enerji/jeotermal-enerji-kullanim-alanlari/>, 11 Nisan 2019.

Url-3, <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-jeotermal-enerji.html>, 11 Nisan 2019.

Url-4, <https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal>, 12 Nisan 2019.

Url-5, <https://www.enerjiatlası.com/jeotermal/>, 13 Nisan 2019.

Url-6, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/gunes-enerjisi-kurulumunda-ilk-10-ulke/19009#ad-image-0>, 16 Nisan 2019.

Url-7, <https://www.enerjiatlası.com/gunes/>, 19 Nisan 2019.

Url-8, <https://harmonigd.com.tr/tr/haber/denizlide-gunes-tarlalari-cogaliyor/> /, 29 Nisan 2019.

Url-9, [https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon\\_iller.aspx](https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx), 10 Mayıs 2019.

Url-10, <https://ideal-makina.com/konsantre-gunes-enerji-sistemleri/>, 11 Mayıs 2019.

Url-11, <https://www.kilsanblog.com/yesil-cevreci-ekolojik/yogunlastirilmis-solar-enerji-sistemleri-gunes-depoluyor/>, 11 Mayıs 2019.

Url-12, [https://nzgeothermal.org.nz/workshop\\_papers/](https://nzgeothermal.org.nz/workshop_papers/), 11 Mayıs 2019.

Yılmaz, F.,” Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2013).

Zhou, C.: Hybridization of Solar and geothermal Energy in Both Subcritical and Süperkritik Organic Rankine Cycles, Energy Conversion & Management, 81, 72–82, (2014).

Zhou, C., Doroodchi, E., Munro, I., and Moghtaderi, B.: A Feasibility Study on Hybrid Solar–Geothermal Power Generation, Proceedings, New Zealand geothermal workshop 2011 proceedings, Auckland, New Zealand, (2011).



## 9. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Alper ÇEÇEN

**Doğum Yeri ve Tarihi** : KIRŞEHİR / 10 Mayıs 1992

**Lisans Üniversite** : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mimarlık-  
Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 2017

**Elektronik posta** :alpercecenenerji@gmail.com

**İletişim Adresi** : Milli Savunma Üniversitesi Rektörlüğü, Yapı İşleri ve  
Teknik Daire Başkanlığı Yenilevent/Beşiktaş/İSTANBUL