



**JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMLERİN
VE SİSTEM PARAMETRELERİNİN PERFORMANS ÜZERİNE
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU

Danışman

Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ BİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMLERİN
VE SİSTEM PARAMETRELERİNİN PERFORMANS ÜZERİNE
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU

Danışman
Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ BİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU tarafından hazırlanan "JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMLERİN VE SİSTEM PARAMETRELERİNİN PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 20 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği / oy çokluğu** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

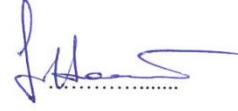
Danışman : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Başkan : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ
Pamukkale Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

İmza



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

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

25 / 07 / 2019



Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMLERİN VE SİSTEM
PARAMETRELERİNİN PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı-Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Jeotermal enerjinin başta elektrik enerjisi elde etme, termal sistemler, sera ve bina ısıtma vb. olmak üzere birçok kullanım alanı vardır. Ülkemizin jeotermal enerji potansiyelinin büyük çoğunluğu Aydın'da ve bunun yanı sıra en yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar ise Manisa'dadır. Bu sebeple araştırma sürecinde her iki ilde bulunan birer santral seçilerek araştırmanın iki il üzerinde yoğunlaşması sağlanmıştır. Bu çalışmada, jeotermal enerjiden elektrik üreten santraller ve soğutma suyu debisi, soğutma suyu giriş sıcaklığı, jeotermal akışkan giriş sıcaklığı ve jeotermal akışkan debisi gibi sistem verimini etkileyen en önemli parametreler baz alınarak grafik ve çizelgelerle ile sistem parametrelerinin performans etkileri araştırılmıştır. Bu santrallerde kullanılan çevrim sistemleri, sistem ana ekipmanları da irdelenmiş ve buna bağlı olarak seçilen ekipmanların elektrik enerjisi üretim performanslarının ve sistem verimliliklerinin kurulu güce etkisi araştırılmıştır.

Net elektrik gücünün elde edilmesinde, soğutma alanının sıcaklığının ve bu sıcaklığa etki eden parametrelerin önemi ortaya konmuştur. Özellikle jeotermal santrallerin soğutma alanlarına yoğunlaşarak; sistem verimini artırmak ve aynı doğrultuda da maliyeti ve iç tüketimi azaltacak çeşitli çalışmalar yapılarak jeotermal santral verimliliğinin artırılması yönünde hem akademik hem de sektörel çalışmaların yapılması gereklidir.

2019, xii + 97 sayfa

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Santral Çevrim Sistemleri, Jeneratörler, Türbinler,
Üretim Maliyeti, Üretim Performansını Etkileyen Parametreler.



ABSTRACT
M.Sc. Thesis

THE COMPARİSİON OF GEOTHERMAL ELECTRİC POWER PLANTS İN
RESPECT TO THEIR PRODUCTION PERFORMANCES AND COSTS

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Engineering - Renewable Energy Systems

Supervisor: Prof. Ahmet YILDIZ

Geothermal energy has many usage areas as obtaining electrical energy, thermal systems, greenhouse and building heating and so on. Most of the geothermal energy potential of our country is in Aydın and the highest temperature geothermal resources are in Manisa. For this reason, one each power plants in both provinces were selected during the research process and the research was focused on two provinces. In this study, the power plants which generating electricity from geothermal energy and the effects of system parameters on performance and the most important parameters affecting the system efficiency such as cooling water flow, cooling water inlet temperature, geothermal fluid inlet temperature and geothermal fluid flow based graphs and tables are investigated. The conversion systems used in these plants, generators, turbines, cooling towers and condensers which are the main equipment of the system are also examined and therefore the effects of electrical energy production performances and system efficiencies of the selected equipments on the installed power were investigated.

Obtaining net electricity power, temperature of the cooling area and the importance of parameters that affecting this temperature has been demonstrated. Particularly focusing on the cooling areas of geothermal power plants; Both academic and sectoral studies are required to increase the efficiency of the geothermal power plant by increasing the efficiency of the system and reducing the cost and internal consumption.

2019, xii + 97 pages

Keywords: Geothermal Power Plant Cycle Systems, Generators, Turbines, Factory Cost, Parameters Affecting Production Performance.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet YILDIZ'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, tez savunma aşamasında tezimi inceleyerek katkı sağlayan hocalarım Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ ve Doç. Dr. Fatih Onur HOCAOğLU 'na teşekkür ederim. Ayrıca verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanmasında büyük yardımlarını gördüğüm AFJET A.Ő'nde görevli Yüksek Elektrik-Elektronik Mühendisi Cihan ŞAHİN' e teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Yasin KUŞCU'ya, annem Methiye BALKAN'a ve canım kardeşlerime teşekkür ederim.

Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Jeotermal Enerji	4
2.2 Jeotermal Enerjinin Kullanımı	6
2.3 Jeotermal Enerji Uygulama Alanları	10
2.3.1 Dünyada Jeotermal Enerji Uygulama Alanları.....	10
2.3.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji Uygulama Alanları	12
2.3.3 Ege Bölgesinde Jeotermal Enerji Uygulamaları.....	17
a) Aydın İli Jeotermal Enerji Uygulamaları.....	20
b) Manisa İli Jeotermal Enerji Uygulamaları.....	23
2.4 Jeotermal Enerji ile Elektrik Enerjisi Üretim Verileri	25
2.5 Jeotermal Santral Ana Ekipmanları	27
2.5.1 Jeneratörler	27
2.5.1.1 Asenkron Jeneratör	27
2.5.1.2 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör	27
2.5.1.3 Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratör	29
2.5.1.4 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör	30
2.5.2 Buhar Türbini	31
2.5.2.1 Radyal Türbin	32
2.5.2.2 Aksiyal (Eksenel) Türbin.....	33
2.5.3 Soğutma Kulesi	34
2.5.4 Kondenserler.....	35

2.6 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretmek Amacıyla Kullanılan Güç Çevrimleri ..	35
2.6.1 Kuru Buhar Çevrimleri	37
2.6.2 Tek ve Çift Püskürtmeli Çevrimler	41
2.6.3 Binary (ikincil) Çevrimler	46
2.6.4 Kombine Tek Püskürtmeli - Binary (İkincil) Çevrimler	49
2.6.5 Birleşik Püskürtmeli Binary (İkincil) Çevrimler	50
2.6.6 Kalina Çevrimi	52
2.6.7 Çift Kademeli Buharlaştırma (Double Flash).....	55
2.6.8 Organik Rankin Çevrimi (ORC)	56
3. MATERYAL ve METOD.....	57
4. BULGULAR	58
4.1 Jeotermal Santral Üretim Maliyeti.....	58
4.1.1 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi (Levelized Costs) İle Enerji Maliyetinin Belirlenmesi	62
4.1.2 Tek Flaşlı Jeotermal Güç Santralleri İçin Enerji Maliyetinin Belirlenmesi	64
4.1.2.1 Yıllık Sermaye Masrafları	65
4.1.2.2 Yıllık İşletme ve Bakım (O&M) Masrafları	68
4.1.2.3 Toplam Enerji Maliyeti.....	69
4.2 Jeotermal Santral Sistem Parametrelerinin Performansa Etkileri.....	70
4.2.1 Jeotermal Kaynak Debi Değişimine Göre Performans Eğrisi	71
4.2.2 Jeotermal Kaynak Sıcaklık Değişimine Göre Performans Eğrisi.....	72
4.2.3 Soğutma Suyu Debi Değişimine Göre Performans Eğrisi	74
4.2.4 Soğutma Suyu Sıcaklık Değişimine Göre Performans Eğrisi	75
4.2.5 Soğutma Suyu Sıcaklık Değişimine Dış Ortam Sıcaklığının Etkisi.....	77
4.3 Jeotermal Santrallerden Temin Edilen Veriler	78
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	85
6. KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	96

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CO ₂	Karbondioksit
GW	Gigawatt
kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
kg/s	Kilogram saat
km	Kilometre
km ²	Kilometrekare
kWh	Kilowatt saat
MW	Megawatt
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
°C	Santigrat derece
SiO ₂	Silisyum dioksit

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
JES	Jeotermal Enerji Santrali
MTA	Maden Tetkik Araştırma
ORC	Organik Rankine Çevrimi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Dünya üzerinde yüksek entalpili bölgeler.....	4
Şekil 2.2 Jeotermal sistemin oluşumunu gösteren diyagram	5
Şekil 2.3 Jeotermal akışkanların içerdikleri sıcaklıklarına bağlı linal diyagramı	9
Şekil 2.4 Entegre jeotermal sistem genel örneği	12
Şekil 2.5 Ülkemizde yer alan jeotermal alanlar	13
Şekil 2.6 Türkiye’de jeotermal enerji üretim kapasitesinin yıllara göre değişimi	16
Şekil 2.7 Ülkemizde doğrudan kullanım ve güç kapasite değişimi.	17
Şekil 2.8 Ege Bölgesi’nde jeotermal enerji ve bu enerjinin kullanım alanları.....	18
Şekil 2.9 Ege Bölgesi grabenlerinin basitleştirilmiş haritası.....	19
Şekil 2.10 Büyük Menderes Grabeni üzerindeki bazı jeotermal bölgeler.....	20
Şekil 2.11 Aydın fay hattı haritası.....	21
Şekil 2.12 Aydın’daki jeotermal sahalar	22
Şekil 2.13 Manisa fay hattı haritası	23
Şekil 2.14 Mart 2019 dönemine ait lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılım yüzdesi	26
Şekil 2.15 Mayıs 2019 dönemi kaynaklara göre güç değerleri	26
Şekil 2.16 Sincap Kafesli Asenkron Motor.....	28
Şekil 2.17 Türbin kesit görünüşü	31
Şekil 2.18 Radyal türbin 3D kesiti.	33
Şekil 2.19 Aksiyal türbin 3D kesiti	33
Şekil 2.20 Soğutma kulesi prensip şeması	34
Şekil 2.21 Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal santrali akış diyagramı	38
Şekil 2.22 Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal santrali akış diyagramı	39
Şekil 2.23 Kuru buhar çevrimi	39
Şekil 2.24 Kuru buhar çevrimi için elektrik üretimini gösteren numune santral diyagramı.	41
Şekil 2.25 Püskürtme işlemi sırasında suyun basınç-sıcaklık diyagramı	42

Şekil 2.26	Jeotermal elektrik santrali tek püskürtmeli çevrim akış diyagramı	44
Şekil 2.27	Jeotermal elektrik santrali çift püskürtmeli çevrim akış diyagramı	45
Şekil 2.28	Binary çevrim jeotermal santral	46
Şekil 2.29	Binary sistem jeotermal santralinin sadeleştirilmiş akış şeması	47
Şekil 2.30	Binary çevrim örnek jeotermal elektrik santrali.....	49
Şekil 2.31	Kombine tek püskürtmeli-binary sistem jeotermal santralinin akış şeması..	50
Şekil 2.32	Birleşik püskürtmeli-binary sistem jeotermal santralinin akış şeması	51
Şekil 2.33	Kalina çevrimli jeotermal santralinin akış diyagramı	54
Şekil 2.34	Çift buharlaştırmalı (Double Flash) sistemi	55
Şekil 2.35	ORC sistem şeması	56
Şekil 4.1	Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri	59
Şekil 4.2	Belirlenen santrallerin sabit işletme maliyetleri.....	59
Şekil 4.3	Belirlenen santrallerin değişken işletme maliyetleri.	60
Şekil 4.4	Santral tipine göre ilk yatırım ve işletme maliyetleri	60
Şekil 4.5	Eskalasyon oranının birim enerji maliyeti ile değişim grafiği	69
Şekil 4.6	Faiz oranının birim enerji maliyeti ile değişimi	70
Şekil 4.7	Tek flaşlı santrallerde birim elektrik üretim maliyetinin santral gücüne bağlı değişimi.....	70
Şekil 4.8	Jeotermal akışkan debi değişimine göre net elektrik üretim grafiği.	71
Şekil 4.9	Jeotermal akışkan sıcaklık değişimine göre net elektrik üretim grafiği.....	73
Şekil 4.10	Soğutma suyu debi değişimine göre net elektrik üretim grafiği.	74
Şekil 4.11	Soğutma suyu giriş sıcaklık değişimine göre net elektrik üretim grafiği.	76
Şekil 4.12	Türkiye’deki bir jeotermal santralden alınmış enerji değişim görüntüsü	78
Şekil 4.13	Aydın Jeotermal Santrali’nden anlık SCADA görüntüsü	82
Şekil 4.14	En önemli jeotermal türbin üretici firmaları	84
Şekil 4.15	En önemli jeotermal saha operatörleri	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Rezervuar sıcaklıkları ve kullanımı	8
Çizelge 2.2 Ülkemizde yer alan bölgesel ısıtma sistemleri.....	14
Çizelge 2.3 Ülkemizde elektrik üretilen ve üretimi yapılabilecek enerji sahaları ve rezervuar sıcaklıkları	15
Çizelge 2.4 Türkiye’de jeotermal enerji mevcut durumu	16
Çizelge 2.5 Türkiye’de elektrik elde edilen jeotermal sahalar ve kuyu sıcaklıkları	24
Çizelge 2.6 Manisa’da kurulu haldeki jeotermal enerji santralleri.	25
Çizelge 2.7 Türkiye’de Mayıs 2019 dönemi birincil kaynaklara göre santral adetleri ve kurulu güç değerleri	27
Çizelge 2.8 Türkiye’de santral türleri ve soğutma sistemleri.....	36
Çizelge 4.1 Enerji santrali maliyetleri.....	58
Çizelge 4.2 Jeotermal santral kuyu açma maliyeti çizelgesi	60
Çizelge 4.3 Küçük binary jeotermal güç santrallerinde sermaye ve O&M maliyetleri .	61
Çizelge 4.4 Analizlerde elde edilen ve süreçte kullanılan bazı değerler.....	64
Çizelge 4.5 İnşaat süresince eskalasyon hesabı.....	65
Çizelge 4.6 İnşaat süresince faiz hesabı	66
Çizelge 4.7 Sabit yıllık sermaye masrafı ve “Levelized Costs” metodu ile sermaye maliyetinin hesabı	67
Çizelge 4.8 Levelized Cost Metodu ile O&M maliyetinin hesaplanması.....	68
Çizelge 4.9 Jeotermal akışkan min-max akış miktarına göre net elektrik üretimi	71
Çizelge 4.10 Jeotermal akışkan min-max sıcaklığına göre net elektrik üretimi.	72
Çizelge 4.11 Soğutma suyu debi değişimine göre net elektrik üretimi.....	74
Çizelge 4.12 Soğutma suyu sıcaklık değişimine göre net elektrik üretimi.	75
Çizelge 4.13 Alaşehir-Aydın jeotermal santralleri karşılaştırması.	80
Çizelge 4.14 Jeotermal alanında önemli ülkelerin MWe olarak jeotermal kurulu güç listesi.	83

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Dünyadaki çeşitli jeotermal enerji uygulamaları.....	10
Resim 2.2 DORA-2 Jeotermal Enerji Santrali	22
Resim 2.3 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör.....	29
Resim 2.4 Rotor sargılı asenkron jeneratör.....	30
Resim 2.5 Alternatör parçası.....	31
Resim 2.6 Bir santral türbin bakımı	32
Resim 2.7 İtalya- Larderello alanındaki jeotermal kaynak	37
Resim 2.8 Buhar ağırlıklı büyük sahalar.....	40
Resim 4.1 Alaşehir Jeotermal Santrali.....	79
Resim 4.2 Aydın Jeotermal Santrali.....	81

1. GİRİŞ

Dünya’da ve ülkemizde petrol, doğalgaz, kömür vb. fosil yakıt rezervlerinin hızla azalması, buna alternatif olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı araştırmalarının hız kazanmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji; hâlihazırda doğada bulunan kaynaklardan elde edilen ve sürekli döngüsel bir akış içerisinde var olan enerjidir. Atmosfere büyük oranlarda zarar veren karbondioksit (CO₂) ve sera gazı salınımlarının olmaması, temiz, doğa dostu ve sürdürülebilir olan yenilenebilir kaynaklarının kullanımı ve yeni kaynak arayışları gün geçtikçe artmaya devam etmektedir.

Hızla artmakta olan dünya nüfusuna birçok alanda gerekli olan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için kullanılan mevcut enerji kaynaklarının sınırlılığı, atmosfere ve dünyaya verdiği zararların yüksek olması, kaynağa ulaşma ve kaynağı kullanım maliyetlerinin yüksek olması yenilenebilir enerji kaynaklarını daha gözde hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları denilince akla ilk olarak güneş ve rüzgâr enerjisi gelse de; yenilenebilir enerji kaynakları biyokütle, güneş, hidrolik, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynakları olarak sıralanabilmektedir. Dünya’da ve ülkemizde akarsular üzerine kurulmuş hidroelektrik santralleri, verimliliği yüksek güneş ve rüzgâr tarlaları, bitki, hayvan atıklarına ek olarak çöplerden elde edilen biyokütle enerjisi, yer altından çıkarılan sıcak su kaynaklı jeotermal enerji santrallerinden elde edilen temiz ve düşük maliyetli elektrik enerjisinin kullanım alanları yaygınlık göstermektedir.

Jeotermal enerji; yer kürenin derinliklerinde ısınan, sıcaklıkları yüksek, erimiş mineral, tuz ve gaz da bulunduran akışkanların yeryüzüne çıktığındaki ısı enerjisinden elektrik enerjisi edilen sistemdir. Jeotermal kaynakların kullanım alanı oldukça yaygındır. Öncelikle elektrik enerjisi elde edilmesi, konut, yol veya hava alanı vb. alanlar ile seraların ısıtılması, sebzeçilik ve çiçekçilik sektörlerinin yanı sıra tavuk, büyük baş hayvan çiftliklerinin çevre ısıtılması, termal tedavi sistemleri, yüzme havuzu ısıtmaları, turizm odaklı merkez ve tesisler bu kullanım alanlarına verilebilecek örneklerdendir. Ayrıca yurt dışında tropikal bitki yetiştiriciliği, bitki ve balık yetiştirme çiftliklerinin ısıtılması gibi alanlarda da yine jeotermal kaynaklardan faydalanılmaktadır. Jeotermal kaynağının kullanım alanını yer altından çıkan suyun sıcaklığı belirlemektedir. Yer altından çıkarılan bu suların kullanıldıktan sonra yeniden yer altına gönderilmesi,

kaynağın sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Kaynaktan çıkarılan sıcak su çeşitli alanlarda kullanımının ardından mevcut ısını kaybederek kaynağa yeniden gelmekte ve burada re-enjeksiyon pompaları yardımıyla rezervuar alanına aktarılarak orada magmanın sıcaklığıyla yeniden ısınması sağlanmaktadır.

Jeolojik yapısı sayesinde jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi açısından ülkemizin en verimli alanı olan Ege Bölgesi; jeotermal enerjiyle elektrik enerjisi elde edilen tek bölge olma özelliği taşımaktadır. Ülkemizde jeotermal enerji potansiyelinin büyük çoğunluğu Aydın'da olmasına rağmen en yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar ise Manisa'da bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında mevcut şartlardaki jeotermal santraller ve bu santrallerden temin edilen veriler irdelenerek jeotermal enerjiden elektrik üreten sistemlerin ve bu sistem parametrelerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması, bu araştırma sonucunda optimal düzeyde ve verimi yüksek bir jeotermal santral için gerekli verilerin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra Türkiye'de jeotermal enerji potansiyeli baz alındığında bu tez çalışmasının çeşitli santral yatırımlarına referans olması amaçlanmıştır.

Bu hedefler doğrultusunda tez çalışmasında Ege Bölgesindeki mevcut jeotermal santraller arasında Aydın ve Manisa illerindeki bazı jeotermal santrallerden temin edilen veriler ışığında bu santrallerin özellikle üretim performansı irdelenmiştir. Jeotermal enerjiden elektrik üreten sistemlerin ve bu sistem parametrelerinin performans üzerine etkileri grafik eğrileriyle kıyaslanmış ve en yüksek verim alınabilecek parametreler üzerinde yorumlar yapılmıştır. Soğutma suyu debisi, soğutma suyu giriş sıcaklığı, jeotermal akışkan giriş sıcaklığı ve jeotermal akışkan debisi gibi sistem verimini etkileyen en önemli parametreler baz alınarak grafik ve tablolar ile sistem parametrelerinin performansa etkileri gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda çeşitli değerler sabit tutulduğunda net elektrik gücünün elde edilmesinde soğutma alanının sıcaklığının ve bu sıcaklığa etki eden parametrelerin önemi ortaya konmuştur. Bu santrallerde kullanılan çevrim sistemleri, sistem ana ekipmanlarından olan jeneratörler, türbinler, soğutma kulesi ve kondenserler de irdelenmiş ve buna bağlı olarak seçilen

ekipmanların elektrik enerjisi performanslarının sistem verimliliklerinin kurulu güce etkisi araştırılmıştır. Jeotermal santrallerde kullanılan ikincil akışkanın termodinamik özelliğinin sistem parametreleri üzerinde etkisi araştırılmıştır.

Bunun yanı sıra bir jeotermal santralden maksimum güç alınabilmesi ve optimal düzeyde tasarımın sağlanabilmesi için öncelikle jeotermal kaynağın karakteristik özelliğinin çok iyi analiz edilmesi bunun yanı sıra verilerin doğru toplanması gerektiği belirlenmiştir. İdeal bir sistem olmaması ve bunun temelinde kuyu sıcaklığı, rezervuar koşulları, entalpi, basınç ve debi değerleri dikkatle irdelenmiş ve atmosferik şartları sağlanmış bir bölgede santral kurulumu gerçekleştirilecek ise kuyu sıcaklığına bağlı olarak doğru santral tipinin kullanılması ve bu sistemde kullanılan ana ekipman seçiminin önemi üzerinde durularak literatüre katkı sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji elde etme ve bu elde edilen enerjinin kullanım tarihinin M.Ö. 1000 yıllarında olduğu, çok farklı amaçlarla kullanıldığının kanıtları mevcuttur. Fakat bu enerjinin jeotermal potansiyel olarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılması 1900'lü yıllara kadar uzanmaktadır (İncili 2006, Bilgiç 2015).

Yer kabuğunda meydana gelen çeşitli hareketlenmeler ve değişimler sonucunda jeotermal alanlar meydana gelmektedir. Dünyada en çok jeotermal hareketliliğin gözlemlendiği yerlerde dalma-batma bölgeleri, kıtasal çarpışma bölgeleri sıklıkla görülmektedir. Yer kabuğunun bu hareketli alanları aynı zamanda deprem yoğunluğunun fazla yaşandığı yerlerdir (İncili 2006, Bilgiç 2015). Şekil 2.1'de Jeotermal enerjinin dünya üzerindeki çeşitli alanlardaki dağılımı görülmektedir.

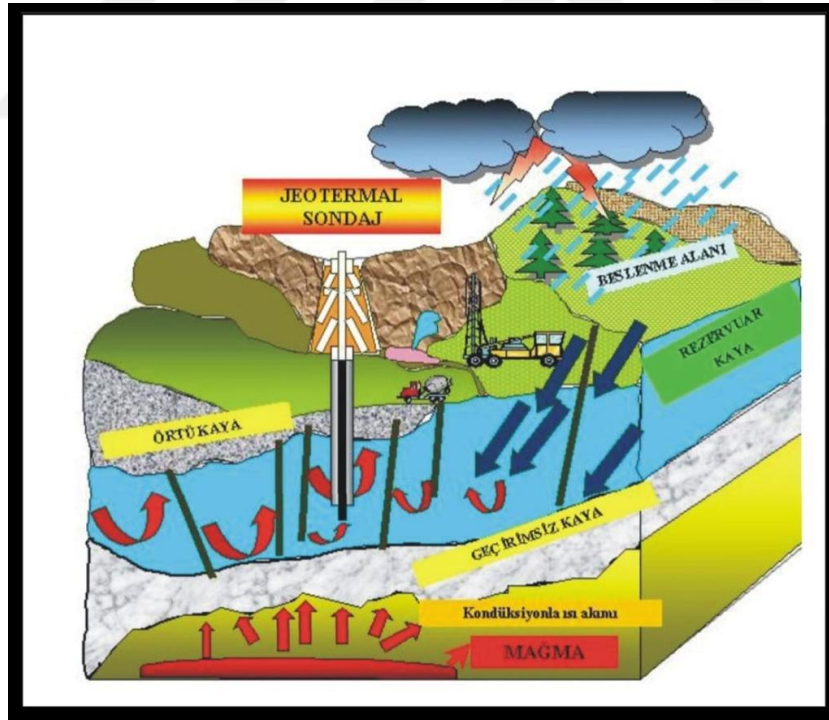


Şekil 2.1 Dünya üzerinde yüksek entalpili bölgeler (Yıldız 2014).

Jeotermal enerji; yer kürenin farklı derinliklerinde bulunan ısının oluşturduğu, sıcaklıkları düzenli bir şekilde atmosferik yüzey sıcaklığının üst seviyelerinde ve bulunduğu alandaki yer üstü ve yer altı sıcak sıvılara ve sulara göre daha çok erimiş

mineral, farklı miktarlarda tuzlar ve hatta gaz da bulunduran sıvıların yer kürenin üzerine aktardığı ısı enerjisi şeklinde tanımlanabilmektedir. Bu enerjinin yer küre üzerine taşınmasını sağlayan akışkan sıvı jeotermal akışkan olarak tanımlanır. Bunun yanı sıra herhangi bir sıvı akışkan ihtiva etmediği halde çeşitli yöntemlerle sıcaklığından faydalanılan, yer kürenin derinliklerinde bulunan çeşitli sıcaklıktaki kuru kayaçlar da jeotermal enerji kaynağı şeklinde ifade edilebilmektedir.

Jeotermal akışkanı oluşturan sıvılar ve hatta sular çoğunlukla meteorik kaynaklı olmakta, yer kürenin alt kısımlarındaki rezervuarlar genellikle bu suları kaynak olarak kullanmakta ve bu kaynaklar bu suların yer değiştirmesi ile yenilenmektedir. Bu sebeple kaynaktaki bulunan su miktarından daha fazla kullanım olmadığı sürece jeotermal kaynaklar da azalma olması beklenmemektedir (Tamyerli 2007). Şekil 2.2’de bir jeotermal sistemin akışkanını besleyen kaynak ve jeotermal sistemin oluşumunu gösteren bir diyagram verilmiştir.



Şekil 2.2 Jeotermal sistemin oluşumunu gösteren diyagram (Zaim ve Çavşı 2018).

Jeotermal kaynaklar; erimiş kar suları, deniz suyu, çeşitli zamanlarda yağın yağmur suları ve yer altından çıkarılan sıcak akışkan sıvının re-enjeksiyonla yeniden yer altına

aktarılmasıyla beslenirler. Bu sebeple yenilenebilir ve hatta sürdürülebilir olma özelliğini devam ettirir (Şentürk 2009).

Jeotermal enerji kaynaklarının diğer kaynaklardan avantajları:

- Sürdürülebilir ve yenilenebilir özellik taşıyan kaynaklardır.
- Jeotermal enerji kaynakları çevre dostudur çünkü diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi zararlı gaz açığa çıkarmazlar ve bu sebeple de temiz enerji olarak adlandırılırlar.
- Jeotermal enerji kaynakları yereldir, dış kaynaklardan elde edilmediği için herhangi bir politik sorundan etkilenme olasılığı bulunmamaktadır. Bu nedenle de ekonomik olarak bakıldığında istikrarsızlık göstermemesi beklenir.
- Ekonomik enerji kaynaklarından biri olma özelliğini; taşıma masrafı bulunmamasından ve kurulum masraflarını kısa sürede karşılayabilmesinden almaktadır.
- Jeotermal enerji kaynakları iklim koşullarından etkilenmemektedir.
- Jeotermal enerji kaynakları yer altından sıcak akışkanın elde edilmesi yönüyle kullanıma en hazır enerji kaynağıdır. Yerleşim alanlarında rahat kullanım özelliği ise taşıma problemleri içermemesindedir.

Jeotermal enerji kaynakları güvenilirdir çünkü herhangi bir zehirlenmeye neden olmamaktadır ayrıca patlama ya da yangın riskleri de yok denecek kadar azdır (Ergün ve Civek 2007, Şentürk 2009).

2.2 Jeotermal Enerjinin Kullanımı

Petrol gibi fosil kökenli kaynaklarımızın rezervlerinin sınırlı ve tükenmekte olması, bu kaynakların çevreye verdiği zararlar ayrıca 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri nedeniyle bu kaynaklar yerine daha yeni ve tükenmeyen enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmış ve halen kullanılmakta olan kaynaklarda da enerji tasarrufunun öneminin farkına varılmıştır. Bugün tüm dünya üzerinde yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, yakıt hücreleri, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen

enerjisi gibi ucuz ve çevre dostu temiz enerji kaynaklarından daha fazla yararlanılabilmesi için gerekli araştırmalar da hız kazanmıştır. Bu sebeple dünya üzerindeki sıcak su kaynakları ve jeotermal enerjinin önemi de hızla artmıştır. Dünya genelinde birden fazla ülke jeotermal enerjiden doğru ya da dolaylı kanallarda faydalanılmaya devam etmektedir.

Jeotermal sistemlerde yer altından yüzeye çıkarılan sıvının dönüşümlü olarak kullanılabilmesi ayrıca çeşitli sıcaklıklara göre kullanım yelpazesinin geniş olması, jeotermal sistemlere olan yatırımların artmasına ve yatırımları daha ekonomik kılmaktadır. Jeotermal enerjinin çeşitli kullanım sahaları bulunmaktadır, bunların başlıcaları; santraller ile elektrik enerjisi üretimi, konut ya da sera ısıtılması, çevre sulamasıdır. Bunun yanı sıra çeşitli bitki ve balık yetiştirilen çiftliklerde, hayvan çiftliklerinin düşük sıcaklıklarla ısıtılmasında, bazı ülkelerde cadde ya da havaalanlarında uçak kalkış pistlerinin ısıtılmasında, dünya genelinde ve ülkemizin birçok yerinde termal tesislerde, yüzme havuzlarında, turistik merkezlerde de jeotermal enerjinin sıcaklığından yararlanılmaktadır. Ayrıca kimya ve sağlık sektöründe sterilizasyon işlemlerinde, çeşitli yiyecek kurutma işlemi yapan işletmelerde, konservecilikte, mobilya ve kerestecilik işlerinde, dokuma endüstrisinde, ağaç kaplama sanayisinde, deri kurutma ve derinin işlenmesi sürecinde derinin ağartma maddesi şeklinde kullanılmakta, dokuma endüstrisinde ve ağaç sanayisinde, kâğıt endüstrisinin çeşitli alanlarında, soğutma tesislerinde, ilaç sanayisinde, şeker ve süt fabrikalarının ısıtılması ve ışıl işlem merkezlerinde de jeotermal enerjiden yararlanılmaktadır. Bunlara ek olarak jeotermal akışkan kullanılarak çok sayıda kimyasal madde de elde edilebilmektedir.

Jeotermal enerjide akışkan sıcaklığından yüksek oranda yararlanabilmek ve bu akışkanın mevcut haldeki enerjisini daha verimli kullanabilmek için uygulama alanındaki ortam sıcaklığının ve mevcut dış atmosfer sıcaklık değerinin de bilinmesinde fayda vardır (Tuğcu 2002, Tamyerli 2007).

Jeotermal akışkanın kullanımı büyük ölçüde termodinamik özelliklerine ve kimyasına bağlıdır. Bu faktörler sıvının kaynaklandığı jeotermal sistem tarafından belirlenir.

Jeotermal akışkanlar farklı yazarlar tarafından farklı sınıflandırılmıştır. Bazı yazarlar entalpi kullanırken diğerleri sıcaklıkları kullanarak yapmıştır. (Dickson and Fanelli 2004, Mburu 2010). En yaygın kriter entalpi temellidir. Kaynaklar düşük, orta ve yüksek entalpi kaynaklarına ayrılmıştır.

- 1) Düşük Sıcaklıklı Sahalar (20-70°C)
- 2) Orta Sıcaklıklı Sahalar (70-150°C)
- 3) Yüksek Sıcaklıklı Sahalar (150°C ‘den yüksek sıcaklıklar)

Bunun yanı sıra Çizelge 2.1’de rezervuar sıcaklıklarına bağlı olarak kullanılabilen bazı jeotermal çevrim sistemleri de verilmiştir.

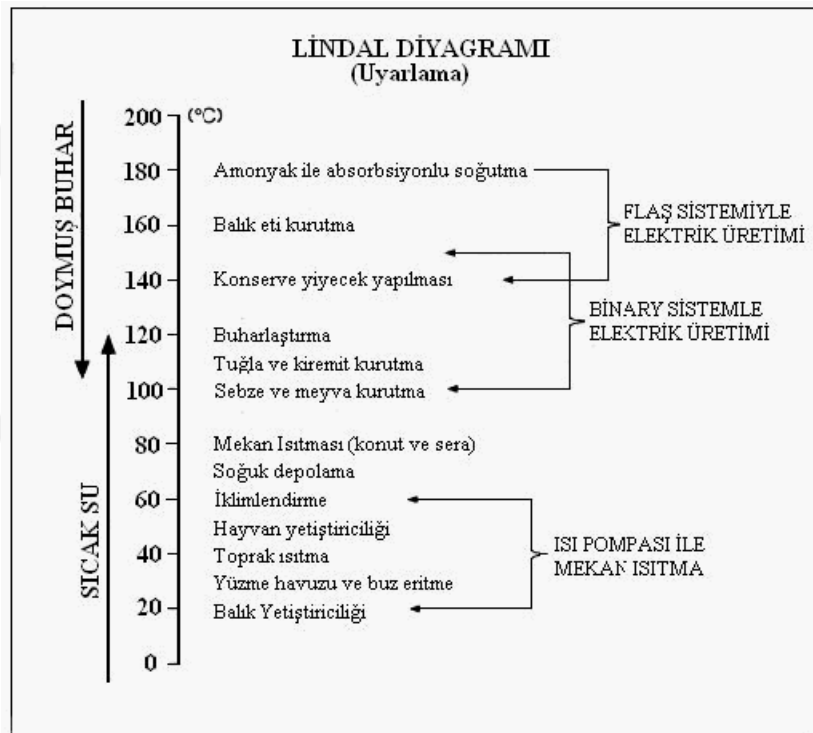
Çizelge 2.1 Rezervuar sıcaklıkları ve kullanımı (Mburu 2010).

Rezervuar sıcaklığı	Rezervuar sıvısı	Genel kullanım	Seçilen ortak teknoloji
Yüksek sıcaklık >220 °C	Su veya buhar	Güç üretimi ve doğrudan kullanım	Flaş Buhar, Kombine (Flash ve Binary) Çevrim Doğrudan sıvı kullanımı; ısı eşanjörleri, ısı pompaları
Orta Düzey sıcaklık 100-220 °C	su	Güç üretimi ve doğrudan kullanım	Binary Çevrim Doğrudan sıvı kullanımı; ısı eşanjörleri, ısı pompaları
Düşük sıcaklık 30-150 °C	su	Doğrudan kullanım	Doğrudan sıvı kullanımı; ısı eşanjörleri, ısı pompaları

Düşük ve orta sıcaklıklı sahalar, ekonomik şartlar ve kullanılan teknoloji koşulları göz önünde bulundurulduğunda başta konut ve sera ısıtılması olmak üzere endüstri alanında kerestecilikte, deri işçiliğinde, yiyecek kurutulması işlemlerinde, kâğıt sanayisinde, soğutma tesislerinin yanı sıra dokuma sanayisinde, kimya sektöründe (amonyum bikarbonat, borik asit, yer altından çıkarılan sıcak akışkanda bulunan karbondioksitten (CO₂) elde edilen buz gibi) kullanılabilir (Dağdaş 2004a, Tamyerli 2007).

Entalpiye bağılı olarak jeotermal akışkan ya elektrik üretimi ya da doğrudan uygulamalar için kullanılabilir. Elektrik üretimi, yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynakların en önemli kullanım şeklidir, düşük-orta kaynaklar ise elektriksiz (doğrudan uygulama) için daha uygundur (Mburu 2010).

Jeotermal enerjide akışkan sıcaklığına göre kullanılan yerler Şekil 2.3'deki Lindal Diyagramında gösterilmiştir. Lindal diyagramı bu adı İzlandalı bir mühendis olan Baldur Lindal'dan almıştır (Şentürk 2009) ve günümüzde halen kullanılmaktadır.



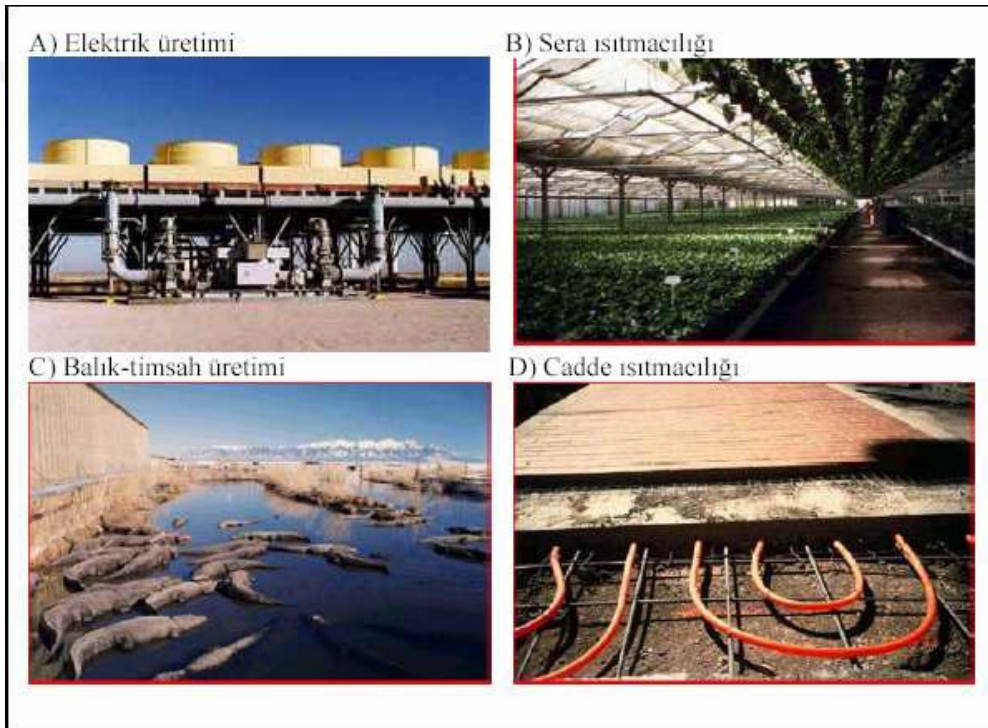
Şekil 2.3 Jeotermal akışkanların içerdikleri sıcaklıklarına bağlı lindal diyagramı (Lund and Freeston 2001, Tamyerli 2007).

Bunlara ek olarak orta sıcaklıklı sahalardan elde edilen akışkanlardan da elektrik enerjisi üretilebilmesi için çeşitli teknolojik süreçlerden yararlanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklı alanlardan elde edilen akışkanlar ise öncelikli olarak elektrik enerjisi üretiminde ve bunlardan başka olarak çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Tamyerli 2007). Günümüz teknolojik şartları sayesinde çok düşük sıcaklıklı kaynaklar bile temiz enerjinin elde edilmesi amacıyla kullanılabilir.

2.3 Jeotermal Enerji Uygulama Alanları

2.3.1 Dünyada Jeotermal Enerji Uygulama Alanları

Dünya tarihinde uzun süre sadece sağlık sektöründe yararlanılan jeotermal kaynaklar ve oradan elde edilen sıcak sular artık sadece bu alanlarda değil konut ısıtmalarında hatta çeşitli enerjilere dönüştürülerek kullanılmaktadır ve teknolojinin ilerlemesiyle günümüzde kullanım alanı yaygınlaşarak çeşitlenmiştir. Resim 2.1’de jeotermal enerjinin çeşitli kullanım alanları örneklenmiştir (Tamyerli 2007).



Resim 2.1 Dünyadaki çeşitli jeotermal enerji uygulamaları (Tamyerli 2007).

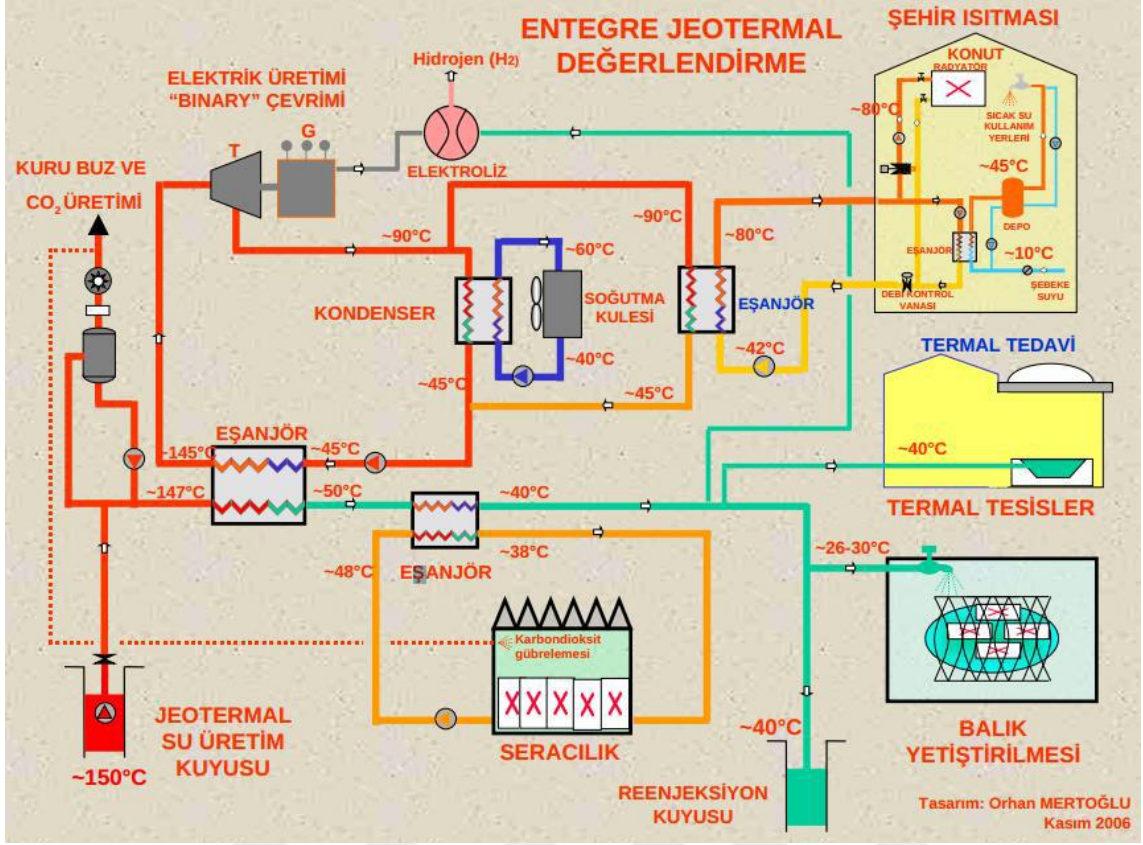
Dünyada kullanılan jeotermal enerji uygulamalarına bakıldığında düşük entalpili akışkanlardan genel olarak ısıtma sistemlerinde yararlanılmaktadır. Bunun yanı sıra çeşitli soğuk ülkelerde; ısı pompaları ve akışkan sıcaklıkları kullanılarak su sıcaklığı 5°C'ye kadar ayarlanabilmektedir. Özellikle soğuk iklim ülkeleri olan İzlanda, Rusya, Kanada'nın yanı sıra Yeni Zelanda, Japonya, Macaristan gibi ülkelerde akışkan sıcaklığı 40°C'den daha yüksek olması durumunda konut ısıtması, kent merkezinde yol ısıtması gibi sistemlerden faydalanılmaktadır. Jeotermal enerjinin en yaygın kullanım alanı olarak gösterilen sera ısıtma sistemleri iken bu akışkanlar sera ısıtma sisteminin

devamında da sebzeçilikte ve çiçekçilikte de oldukça fazla kullanım alanı bulabilmektedir. Japonya, Çin, gibi ülkelerin yanı sıra İzlanda ve Filipinlerde tropikal bitki yetiştiriciliğinde, balık ve timsah yetiştirme çiftliklerinde, tavuk çiftliklerinin ısıtılmasında, hayvan çiftliklerinin çevre ısıtmasına da yine jeotermal kaynakların sıcaklığından yararlanılmaktadır. İzlanda, Sibiryaya gibi soğuk iklim kuşağındaki ülkelerde cadde ısıtmalarında, havaalanı pistlerinin ısıtılarak buzlanmanın önlenmesinde de yine jeotermal kaynakların sıcaklığından faydalanılmaktadır. Avrupa ülkelerinin yanı sıra ABD, İzlanda ve özellikle de ülkemizde termal tedavi sistemlerinde, yüzme havuzu ısıtmalarında ve turizm odaklı merkez ve tesislerde de jeotermal enerji oldukça fazla kullanılmaktadır.

Dünya üzerinde jeotermal akışkanın endüstriyel uygulamalarından bazıları da bira ve benzeri endüstriyel uygulamaların mayalama işlemi sürecinde sistem ısıtması ve damıtma işlemlerinde ve beton blokların ısıtılarak kurutulması işlemleridir. Jeotermal kaynakların çeşitli işlemler sonrası kimyasal maddeye dönüştürülüp kullanımında da İtalya, Filipinler, ABD ve Meksika'nın en önde geldiği bilinmektedir.

Yüksek entalpili sahalardan elde edilen akışkanların elektrik enerjisi üretiminde kullanılmasının yanı sıra son zamanlarda gerçekleştirilen çalışmalar dâhilinde daha düşük sıcaklıklı akışkanlarda gerçekleşen buharlaşma ve düşük sıcaklıktaki gazlar (freon, izobütan vb) çeşitli sistemden geçirilerek bunlardan da elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Jeotermal enerji kullanılarak elektrik enerjisinin elde edilmesi 1904 senesinde İtalya'da bir santralde gerçekleşmiştir (Tamyerli 2007).

Jeotermal kaynaklar dönüştürülebilir kullanım şekliyle kullanıldığında yüksek verim elde edilebilir. Kaynaktan çıkarılan 150 °C'deki sıcak akışkan sistemsel dönüşüm şeklinde değerlendirildiğinde 30 °C'de iken bile kullanılabilir halde olabileceği Şekil 2.4'de görülmektedir (Ağırkaya 2015).

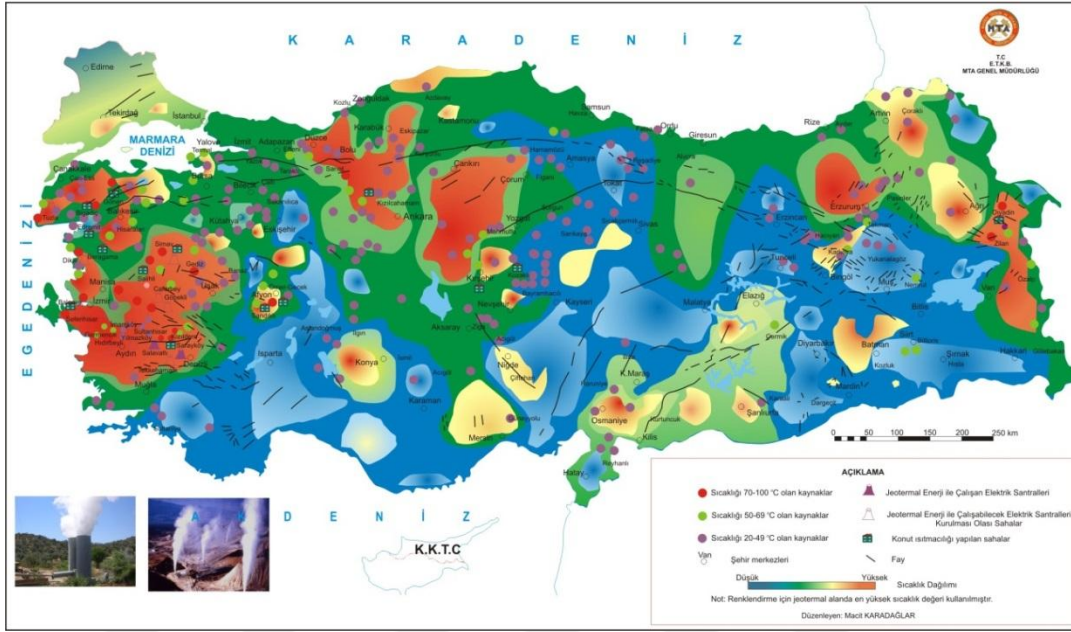


Şekil 2.4 Entegre jeotermal sistem genel örneği (Ağırkaya 2015).

2.3.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji Uygulama Alanları

Türkiye, jeotermal enerji bulundurma ve elektrik elde etme potansiyeli açısından bakıldığında dünyada yedinci sırada gelmekte iken elektrik enerjisi üretimi dışındaki uygulamalarda ise beşinci sırada yer almaktadır. (Tamyerli 2007). Ülkemizde yer alan jeotermal kaynaklar ve jeotermal uygulama haritası Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Türkiye’de jeotermal enerji; temiz enerji olması ve topraklarımızda zengin sıcak su kaynağı bulunması sebebiyle yüksek oranda tercih edilmektedir (Ağırkaya 2015).

Jeotermal Kaynaklar ve Uygulama Haritası



Şekil 2.5 Ülkemizde yer alan jeotermal alanlar (İnt.Kyn. 13).

Ülkemizde yaklaşık son 6 senede jeotermal santral kurulu güç kapasitesinde hızlı bir artış yaşanmıştır. Bunun nedeni devletin jeotermal santrallere verdiği desteğin artmasının yanı sıra bu jeotermal kaynakların geliştirilmesine yönelik izlediği tutumlardır. Türkiye’de 2017 yılında elektrik talebinin %2,1 gibi bir kısmı jeotermal santrallerden karşılanırken 2018’de bu oran %3’e yükselmiştir. Bunlara ilave olarak 700MWe kapasitede santral projeleri geliştirme ve planlama sürecindedir (Satman 2019).

Türkiye’nin jeotermal enerji direk uygulamalarındaki enerji potansiyeli 31.500MWt’dır ve bununda 20 milyon m² sera ve 5 milyon konut ısıtması gerçekleşmektedir. Jeotermal santrallere yakın alanlarda kullanılan bu potansiyel maalesef %3 oranlarında kalmaktadır. Ülkemizde jeotermal enerjinin konut ısıtmasında kullanımı en fazla ege bölgesinde gerçekleşmekte ve bu sistem kullanımı hızla gelişmeye devam etmektedir (Tamyerli 2007). Çizelge 2.2’de ülkemizde yer alan bölgesel ısıtma sistemleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 Ülkemizde yer alan bölgesel ısıtma sistemleri (Küçüka 2015).

Yer	İli	Kaynak Sıcaklığı	Kurul Tarihi	Bölge Gidiş/dönüş sıcaklığı ²	Ücret sist.	Konut Sayısı	Açıklamalar ³
Gönen	Balıkesir	80°C	1987	-		3400	Çelik boru, 2 devreli 2 devreli CTP, sistem 3
Simav	Kütahya	120°C	1991	65/50°C		3200	Devreli olarak çelik boru ile yenileniyor
Kırşehir ¹		54-57°C	1994	48/42°C		1800	Çelik boru, 2 devreli
Kızılcahamam	Ankara	80°C	1995	-		2500	Çelik boru, 2 devreli
Balçova	İzmir	115°C	1996	85/60°C		10000	Çelik boru, 3 devreli
Kozaklı	Nevşehir	90°C	1996	-		1000	Çelik boru, 2 devreli
Afyon		95°C	1996	60/45°C		4500	Çelik boru, 3 devreli
Sandıklı ¹	Afyon	70°C	1998	70/40°C		1600	2 devre, jeoter, devre CTP, bölge devresi
Diyadin	Ağrı	70°C	1999	-		400	Çelik boru, 3 devreli

¹ Pik yüklerde yardımcı ısıtma kazanı kullanılmaktadır.

² Bölge devresi gidiş/dönüş sıcaklıkları bilgisi ilgili işletmeden tlf'la alınmıştır. Ortalama bir değerdir.

³ 2 devreli sistemde, jeotermal ve bölge dağıtım devreleri, 3 devreli ise jeotermal, bölge ve bina dağıtım devreleri birbirinden ısı değiştirgeçleri ile ayrılmıştır.

Türkiye’de sağlık amaçlı sıcak akışkan kullanımı olan balneoloji bölgesel olarak hızla artış göstermektedir. Balneolojik olarak kullanılacak akışkan sıcaklığının 40°C olması beklenirken ülke olarak debi potansiyelimiz 50.000 kg/s’dir. Bu da demek oluyor ki günlük olarak 8 milyon insan kaplıcalardan yararlanabilmektedir (Tamyerli 2007). Buna potansiyelin aynı zamanda 250.000 konutu ısıtabilmeye eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir.

Türkiye ‘de %95i düşük hatta orta sıcaklıklı olmak üzere 170 jeotermal alanında araştırmalarına ilk olarak 1960 yılında MTA başlamıştır. Ülkemizde elektrik üretilen ve elektrik üretimi yapılabilecek enerji sahaları Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

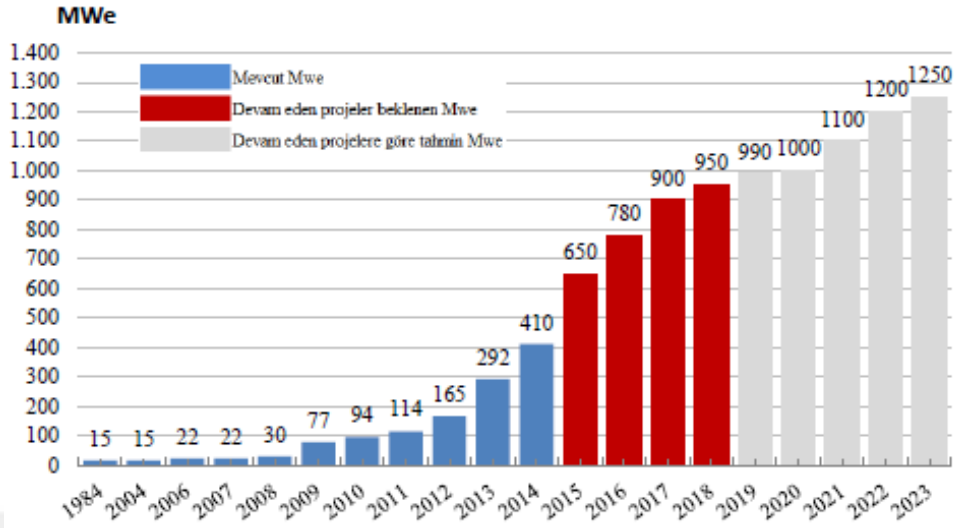
Çizelge 2.3 Ülkemizde elektrik üretilen ve üretimi yapılabilecek enerji sahaları ve rezervuar sıcaklıkları (Zaim ve Çavşı 2018).

Saha Adı	Rezervuar Sıcaklığı (°C)
Kızıldere (Denizli)	212-242
Germencik-Ömerbeyli (Aydın)	232
Kurudere (Salihli)	213
Tekkehamam (Denizli)	210
Göbekli (Salihli)	182
Tuzla (Çanakkale)	174
Salavatlı (Aydın)	171
Eynal-Simav(Kütahya)	162
Caferbeyli(Salihli)	155
Seferihisar (İzmir)	153
İmamköy (Aydın)	142
Balçova (İzmir)	136
Dikili (İzmir)	130

Avrupa'nın sıcak su zenginliği açısından en verimli ülkesi Türkiye olmasına rağmen, ülkemiz bu sıcak akışkandan elektrik enerjisi üretiminde oldukça gerilerdedir. Ülkemiz bu enerji potansiyelini verimli bir şekilde değerlendirememektedir. Günümüz teknolojik şartları kullanılarak kuyu sıcaklığı mevcut 80°C'nin üzerinde bulunan düşük entalpili alanlarda bile enerji üretimi yapılabilmektedir ancak akışkan sıcaklığının azalması süreci ekonomik açıdan yıpratmaktadır (Tamyerli 2007).

Ülkemizde jeotermal enerjiden yararlanma kapasitesi önceleri daha çok balneolojik açıdan iken şuanda elektrik enerjisi üretiminde daha artmaktadır. Şekil 2.6'da ülkemizde jeotermal enerjinin üretim kapasitesindeki değişim ve bu değişimin MWe değerleri gösterilmektedir. Şekil de görüldüğü gibi; 2007 yılındaki 22MWe olan üretim kapasitesi hızla artarak 2016 yılı sonlarında 780 MWe değerine kadar ulaşmıştır. Bu değer 2023'de 1250 MWe olması öngörülmektedir.

Şekil 2.6 Türkiye’de jeotermal enerji üretim kapasitesinin yıllara göre değişimi (Kaya 2015).



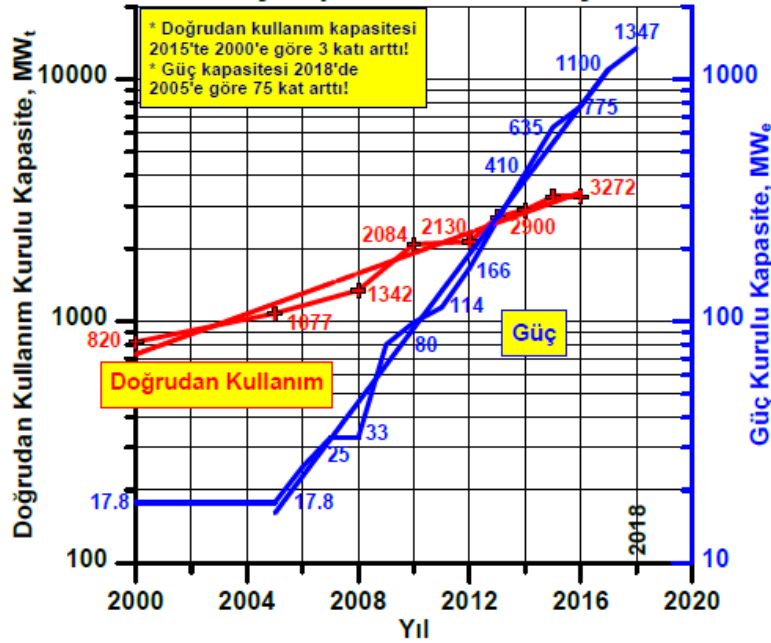
Gelecek senelerde proje aşamasında ve önlisansı alınmış yeni jeotermal santrallerinde devreye girmesi ülkemizdeki jeotermal santralden elde edilen elektrik enerjisinin artmasına sebep olacaktır (Kaya 2016, Zaim ve Çavşı 2018). Çizelge 2.4’de 2017 senesinde Türkiye’de Jeotermal enerji mevcut durumu verilmiştir.

Çizelge 2.4 Türkiye’de jeotermal enerji mevcut durumu (Mertoğlu 2017).

TÜRKİYE’DE JEOTERMAL – Mevcut durum (2017)	
DEĞERLENDİRME	KAPASİTE
Jeotermal Merkezi Isıtma (Şehir,Konut)	115.000 Konut Eşdeğeri (1033 MWt)
Sera Isıtması	3930 Dönüm (760 MWt)
Kaplıca Tesisleri, Termal Oteller ve Devremülk Tesislerinin Isıtması	46.400 Konut Eşdeğeri (420 MWt)
Oteller, Kaplıcalar, Devremülklerde Kullanılan Termal Suyun Isı Enerjisi	400 Kaplıca (1005 MWt)(Yılda 18,5 Milyon Kişi)
Meyve Sebze Kurutma	1,5 MWt
Jeotermal Isı Pompası	42,8 MWt
Toplam Isı Kullanımı	3262,3 MWt (313.000 Konut eşdeğeri)
Toplam Elektrik Üretimi	820 MWe (Aydın-Germencik, Denizli-Sarayköy, Aydın-Salavatlı, Çanakkale-Tuzla)
Karbondioksit Üretimi	240 Bin Ton/Yıl

Jeotermal enerji ülkemizde hem elektrik üretimi amacıyla hem de turizm amaçlı olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.7’de ülkemizde jeotermal gücün elektrik enerjisi elde etmedeki kullanımı ve doğrudan kullanımı ve kapasitesindeki gelişime dair yarı-logaritmik bir grafik bulunmaktadır. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere elektrik enerjisi kurulu gücün kapasitesindeki artış, jeotermal enerjinin doğrudan kullanımındaki artışa oranla daha da

hızlı gerçekleşmiştir (Satman 2019). Bu hızlı artışta; devletin jeotermal santrallerden enerji elde etme politikasındaki gerçekleştirdiği değişiklikler ve devletin verdiği desteğin artması büyük rol oynamıştır.



Şekil 2.7 Ülkemizde doğrudan kullanım ve güç kapasite değişimi (Satman 2019).

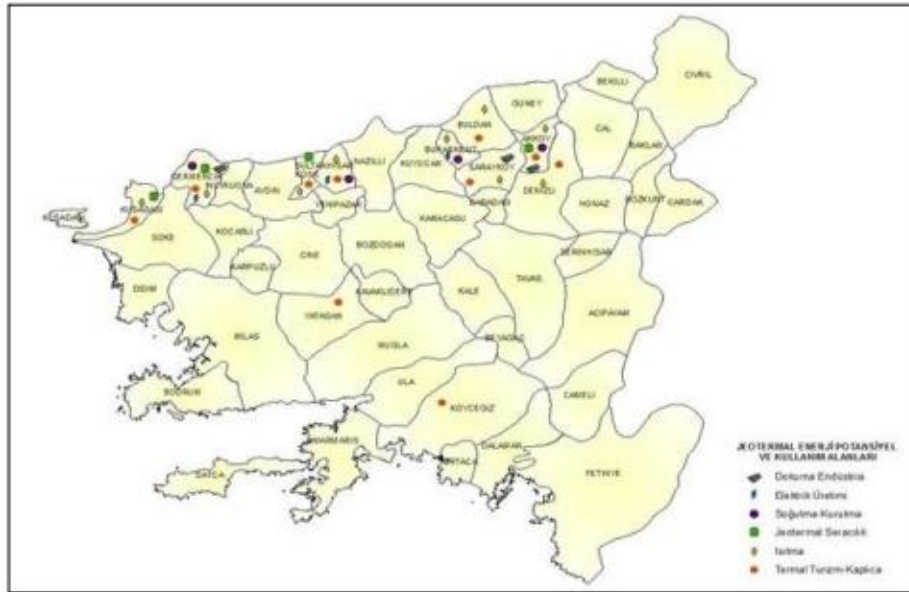
2.3.3 Ege Bölgesinde Jeotermal Enerji Uygulamaları

Ege bölgesi 85.000 km² civarındaki yüzölçümü sayesinde Türkiye'nin ortalama %11'lik yüzeyini kapsar. Ege Bölgesi deniz kenarında bulunan Asıl Ege Bölümü ve iç kısımda kalan İçbatı Anadolu Bölümü olmak üzere iki bölümden oluşur. Ege Bölgesi; nüfus yoğunluğu göz önüne alındığında Türkiye de ikinci büyük bölgedir. Bölge halkının büyük bölümü kentlerde yaşamaktadır.

Ege Bölgesinin yapısına bakıldığında büyük sıradağlar ve bu dağların arasında uzanan vadilerin yanı sıra bu vadileri dolduran doğu-batı uzantılı çukurlar bulunur. Çukur yapının batı kısımları jeolojik zamanlardaki olaylar sonucu denizin içeri ilerlemesiyle koy ve körfez haline gelmiş, bu körfezler akarsu aşındırmaları nedeniyle alüvyon yapıyla kaplanmış, parçalı hal almıştır. Bölgede 2000 m'yi aşan dağlar görülür. Bu dağlar Asıl Ege Bölümü'nün alçak seviyedeki ovaları arasında heybetiyle yer

almaktadır. Menderes Masifi olarak tanımlanan ve Saruhan-Menteşe adı verilen yapı bölgede zeminin temelini oluşturan yapıdır. Bölgede Paleozoyik zaman sonlarına doğru kıvrılmalar yaşanmış ve ilerleyen süreçte akarsu aşındırmalarına maruz kalarak sadeleşmiş olan yapı, Tersiyer Dönemde tekrar zemin hareketleri sonucu yapısal olarak kırık hale gelmiştir. Kırık hat üzerinde bir takım bölgenin kırık yapıyla denk olamayıp çökmesi sonucu graben adı verilen çukursu bölgeler oluşurken, yer hareketleri sırasında sert kayaların seviyesinin artmasıyla de horst adı verilen dağlar meydana gelmiştir. Bölgenin üzerinde bulunduğu sert yapı, etrafındaki deniz biriktirmelerinden oluşan tortullara kalıp görevi yapmıştır (İnt.Kyn.2).

Ege Bölgesi'ndeki ovalar dördüncü jeolojik zaman içerisindeki epirojenik hareketler sonucunda gerçekleşmiştir. Büyük Menderes Deltası graben olarak adlandırılan çukur bölgenin alüvyonla doldurduğu birikinti ovasıdır. Küçük Menderes Deltasının yapısı da Büyük Menderesle aynıdır. Büyük Menderes Irmağı; zaman içerisindeki yer hareketlerinin yanı sıra, Ege Denizinde meydana gelen yükseklik değişiklikleriyle birlikte taşıdığı alüvyon yapıyı bıraktığı bölgelerle kıyıya son şeklini vermiştir (İnt.Kyn.2). Şekil 2.8'de Ege bölgesine ait Jeotermal Enerji alanlarına dair şema bulunmaktadır.



Şekil 2.8 Ege Bölgesi'nde jeotermal enerji ve bu enerjinin kullanım alanları (GEKA 2010, Kemik 2011).

Jeotermal enerji üretimi bakımından Türkiye'nin en verimli topraklarının bulunduğu Ege Bölgesi yer altı sıcak su kaynakları kullanılarak jeotermal enerjiyle elektrik enerjisi elde edilen tek bölgedir.

Büyük Menderes Grabeninde bulunan sıcak su kaynaklarının jeotermal enerji açısından kullanımına dair araştırmalara MTA öncülüğünde 1970'lerde start verilmiştir. Uzun bir süreci kapsayan derin çalışmaların ardından bölgenin tektonik yapısı ve buna bağlı şekilde Menderes Grabeninde önemli jeotermal potansiyel bölgeleri keşfedilmiştir (Doğdu 2006, Kemik 2011). Şekil 2.9'da Ege Bölgesi Menderes Grabenine ait sadeleştirilmiş tektonik harita bulunmaktadır.



Şekil 2.9 Ege Bölgesi grabenlerinin basitleştirilmiş haritası (Yönlü 2008, Gören 2016).

Büyük Menderes Grabeni üzerinde farklı bölgelerde pek çok sayıda jeotermal enerji santrali mevcut olup, saha analiz ve araştırmaları da devam etmektedir.

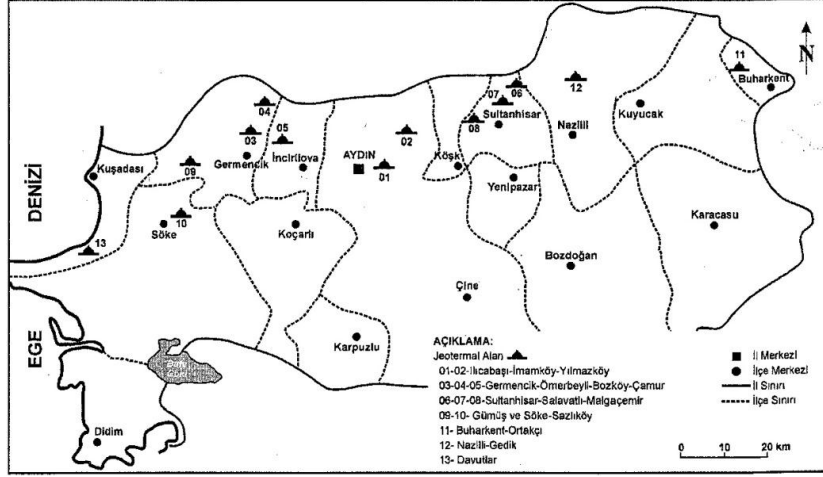
Jeotermal santraller buldukları yer ve kullandıkları sıcak akışkan nedeniyle çeşitli termodinamik koşullarda çalışırlar. Bu sebeple de termik santrallere kıyasla farklı performans gerçekleştirirler ve kuruldukları alandaki rezervuar alanına göre değerlendirilmelidirler (Serpmen ve Türkmen 2007, Halaçoğlu 2015).



Şekil 2.11 Aydın fay hattı haritası (İnt.Kyn.3).

Aydın ilinin sahip olduğu büyük ya da küçük jeotermal sahalardan biri olan Ilıcabaşı-İmamköy Jeotermal Alanı; il merkezinden doğuda kalmaktadır. Sahadaki kuyu ağzı sıcaklığı 38-101,5 °C aralığındadır (Doğdu 2006). DPT'a göre bu saha çoğunlukla termal turizm veya tesis ısıtması açısından kullanıma uygundur (Kemik 2011). Yılmazköy Jeotermal alanında gerçekleştirilen analizlerle 142 °C'lik sıcak su kaynağına ulaşılmış ve bölge Aydın ilinde önemli jeotermal potansiyel olarak yer almaktadır. Germencik-Ömerbeyli Sahası; il merkezinden 15km batıda yer almaktadır ve yüksek sıcaklığa sahiptir. 1982 ile 1999 aralığında bu bölgede 11 tane sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir (Kemik 2011). Sahadaki kuyu ağzı sıcaklığı 70-203 °C aralığındadır. Bozköy-Çamur Jeotermal alanında gerçekleştirilen saha çalışmalarında basit termal tesislerin yaygın olduğu görülmüş ancak sahanın geliştirilmesiyle tesis hatta şehir ısıtması şeklinde de faydalanılabilecektir (Kemik 2011). Bunun yanı sıra sahanın kuyu ağzı sıcaklığı 36-92 °C aralığındadır (Doğdu 2006).

Sultanhisar-Salavatlı Sahası Aydın ilinin 20 km doğusundadır. DPT ve MTA'nın çalışmaları doğrultusunda bölgeden elde edilen sıcak suyun öncelikle elektrik enerjisi üretiminde kullanılması öngörülmüştür (Kemik 2011). Sahadaki kuyu ağzı sıcaklığı 98-145 °C aralığındadır (Doğdu 2006). Malgaçemir Jeotermal sahasındaki kuyu ağzı sıcaklığı 30,5 °C iken Gümüş Jeotermal alanı kuyu ağzı sıcaklığı 37,8 °C civarındadır (Doğdu 2006). Buharkent-Ortakçı Jeotermal Alanındaki kuyu ağzı sıcaklığı 51 °C'dır ayrıca Davutlar-Kuşadası Bölgesinde kuyu ağzı sıcaklığı 26-42 °C aralığındadır (Doğdu 2006). Şekil 2.12'de Aydın ili jeotermal sahaları ve kuyular verilmiştir.



Şekil 2.12 Aydın'daki jeotermal sahalar (Doğdu 2006, Kemik 2011).

Bu bölgelerden ayrı olarak Hıdırbeyli, Sultanhisar, Umurlu ve Atça ilçelerinde de MTA çeşitli araştırmalara devam etmekte ve jeotermal santral inşaları sürdürülmektedir. Bunun yanı sıra 2009 da gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda Kuyucak sahasında 140,31 °C sıcaklığında bir kuyu açılmıştır. İsabeyli sahasında 140,31 °C sıcaklığında kuyu keşfedilmiş ve ayrıca Pamukören alanında da 183-188 °C aralığında sıcaklığa sahip iki kuyu da Aydın iline kazandırılmıştır (Kemik 2011).

Resim 2.2'de Aydın ilinde kurulu büyük jeotermal santrallerden Dora-II Enerji Santrali verilmiştir. Aydın ili Salavatlı jeotermal alanına kurulmuş olan DORA-2 Jeotermal Santrali toplam 9,5 MWe performansa sahiptir. Jeotermal saha il merkezine yaklaşık 26 km mesafede Sultanhisar ve Köşk ilçeleri sınırları içerisindedir (Kemik 2011).



Resim 2.2 DORA-2 Jeotermal Enerji Santrali (Şahin 2013).

MTA tarafından jeotermal enerji kaynağı araştırmalarına yönelik yüksek miktarda analiz ve sondaj çalışmaları yapılmıştır (İnt.Kyn.5).

Jeotermal kaynaklardan; Alaşehir, Turgutlu ayrıca Salihli ilçelerinde öncelikle bina ısıtmada ve elektrik enerjisi elde etmede faydalanılmaktadır. Manisa merkez de ve ilin kuzey kesimlerinde sıcak su kaynağı neredeyse yok denecek kadar azdır (Arslan 2016). Çizelge 2.5’de Türkiye’de elektrik enerjisi elde edilen jeotermal sahalar ve kuyu sıcaklıkları verilmiştir (Kaya 2015, Arslan 2016). Ülkemizde jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi elde edebilmek için gerekli sıcak su kaynaklarından en yüksek değerde olanlar Manisa’dadır. Tablodan da görüldüğü üzere 287 °C’de ülkemizin en yüksek değerlikli sıcak su kaynağı Alaşehir Köseali’de iken 265°C ‘deki yine Alaşehir ilçesindeki kaynak Manisa ilindedir (Arslan 2016). Çizelgede verilen Denizli Bölmekaya bölgesinde doğrudan bu sıcaklıkta akışkan çıkmamaktadır. Tosunlar beldesi bu alanın sınırları içerisinde olduğundan tabloda doğrudan Bölmekaya bölgesi verilmiştir.

Çizelge 2.5 Türkiye’de elektrik enerjisi elde edilen jeotermal sahalar ve kuyu sıcaklıkları (Kaya 2015, Arslan 2016).

Saha Adı	Sıcaklık (°C)	Saha Adı	Sıcaklık (°C)
Manisa-Alaşehir-Köseali	287	Kütahya-Simav	162
Manisa-Alaşehir	265	Aydın-Umurlu	155
Manisa-Salihli-Caferbey	249	İzmir-Seferihisar	153
Denizli-Kızıldere	242	Denizli-Bölmekaya	147
Aydın-Germencik-Ömerbeyli	239	Aydın-Hıdırbeyli	146
Manisa-Alaşehir-Kurudere	214	İzmir-Dikili-H.Çiftliği	145
Aydın-Yılmazköy	192	Aydın-Sultanhisar	145
Aydın-Pamukören	188	Aydın-Bozyurt	143
Manisa-Alaşehir-Kavaklıdere	188	Denizli-Karataç	137
Manisa-Salihli-Göbekli	182	İzmir-Balçova	136
Kütahya-Şaphane	181	İzmir-Dikili-Kaynarca	130
Çanakkale-Tuzla	174	Aydın-Nazilli-Güzelköy	127
Aydın-Salavatlı	171	Aydın-Atça	124
Denizli-Tekkehamam	168	Denizli-Sarayköy-Gerali	114

Çizelge 2.6’da Manisa’da bulunan bazı jeotermal santraller, konumları, kurulu güç potansiyelleri verilmiştir.

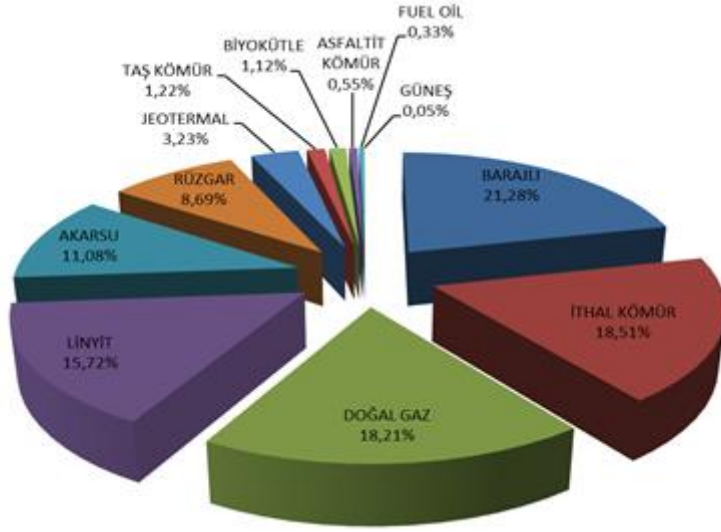
Çizelge 2.6 Manisa’da kurulu haldeki jeotermal enerji santralleri (Arslan 2016).

Santral Adı	Konum	İşletme Durumu	Kurulu Güç (MW)	Türkiye Sıralaması
Zorlu Alaşehir JES	Alaşehir	Aktif	45	5
Enerjeo Kemaliye JES	Alaşehir	Aktif	24,90	8
Türkerler Alaşehir JES	Alaşehir	Aktif	24	12
Sanko JES	Salihli	Yapım Aşamasında	20	-
Türkerler Alaşehir 2	Alaşehir	Üretim Lisansı Alındı	24	-
Özmen JES 1	Alaşehir	Üretim Lisansı Alındı	24	-
Özmen JES 2	Alaşehir	Üretim Lisansı Alındı	40	-
Özmen JES 3	Alaşehir	Üretim Lisansı Alındı	40	-
Zorlu Alaşehir JES 2	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	25	-
Zorlu Alaşehir JES 3	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	50	-
Maspo Jeotermal	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	20	-
Mis 1 JES	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	15	-
Baklacı JES	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	10	-
Sentez Yeşilova JES	Salihli	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	5	-
Sentez Çakıcalı JES	Alaşehir	Ön Lisans Alındı ve Planlandı	5	-
Toplam	-	-	371,9	-

İlin ortalama 371,9 MW değerindeki sıcak su kaynaklı enerji gücünün yalnızca 93,9 MW değerindeki miktarı aktif haldedir. Tabloda görülen işletmeler arasında Alaşehir’deki 45MW değerinde potansiyeli bulunan ve özel bir şirket tarafından işletilen Alaşehir JES ülkemizdeki sıcak su kaynaklı santraller arasında ilk altıda yer almaktadır. Gerekli çalışma ve analizleri tamamlanmış yine özel bir şirket tarafından işletme ruhsatı bulunan 50 MW potansiyeldeki Alaşehir JES3 ise bölgenin en büyük potansiyele sahip santrali olacaktır (Arslan 2016).

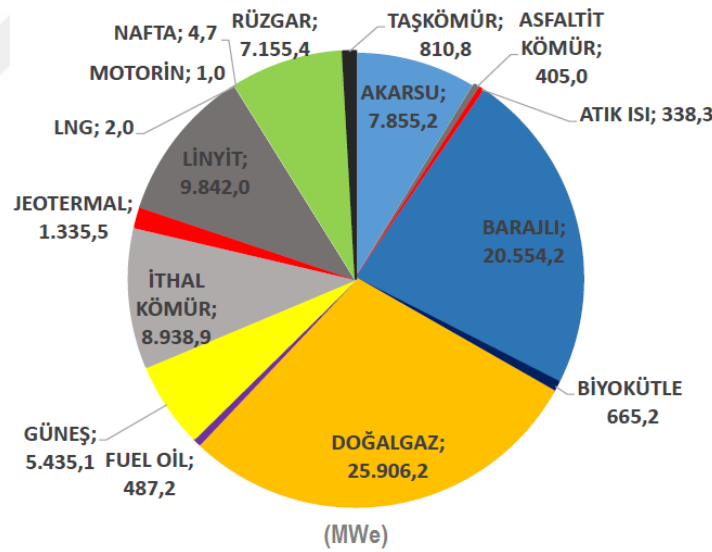
2.4 Jeotermal Enerji ile Elektrik Enerjisi Üretim Verileri

Şekil 2.14’de Türkiye’de 2019 yılı Mart ayındaki lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılım yüzdesi verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında Türkiye’de jeotermal enerjiden elektrik üretim yüzdesinin 3,23 seviyesine yükseldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 2.14 Mart 2019 dönemine ait lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılım yüzdesi (EPDK 2019).

Şekil 2.15’de Türkiye’de MW cinsinden kaynaklara göre kurulu güç değerleri dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.15 Mayıs 2019 dönemi kaynaklara göre güç değerleri (TEİAŞ 2019).

Çizelge 2.7’de Türkiye’de Mayıs 2019 dönemi birincil kaynaklara göre santral adetleri ve bunların kurulu güç değerleri verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere toplam 7922 santralin 48 adedi jeotermal santraldir ve bu jeotermal santrallerin kurulu gücü toplamı 1335,5 MW’dir.

Çizelge 2.7 Türkiye’de Mayıs 2019 dönemi birincil kaynaklara göre santral adetleri ve kurulu güç değerleri (TEİAŞ 2019).

BİRİNCİL KAYNAKLARA GÖRE SANTRAL ADETLERİ VE KURULU GÜÇ		
BİRİNCİL KAYNAK	SANTRAL ADEDİ	KURULU GÜÇ (MW)
Akarsu	541	7.855,2
Asfaltik Kömür	1	405,0
Atık Isı	74	338,3
Barajlı	121	20.554,2
Biyokütle	150	665,2
Doğalgaz	323	25.906,2
Fuel Oil	15	487,2
Güneş	6.323	5.435,1
İthal Kömür	14	8.938,9
Jeotermal	48	1.335,5
Linyit	48	9.842,0
Lng	1	2,0
Motorin	1	1,0
Nafta	1	4,7
Rüzgar	257	7.155,4
Taş Kömürü	4	810,8
TOPLAM	7.922	89.736,7

2.5 Jeotermal Santral Ana Ekipmanları

2.5.1 Jeneratörler

2.5.1.1 Asenkron Jeneratör

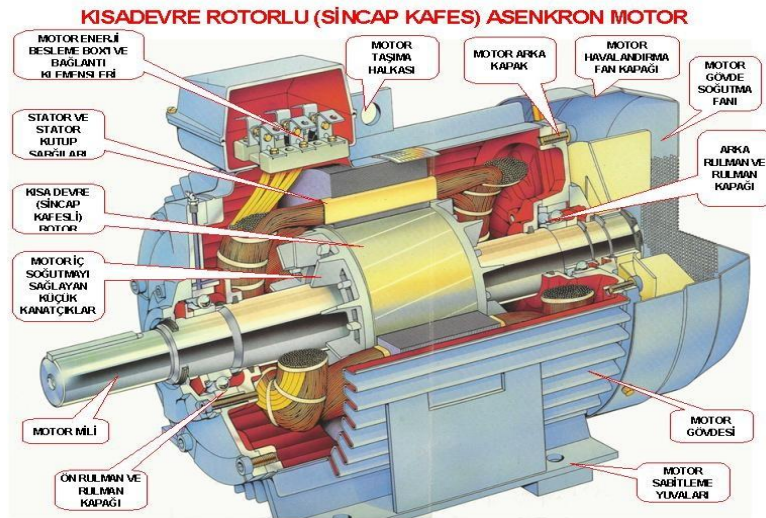
Yaygın şekilde tercih edilen bir jeneratör tipidir. Fiyatının düşüklüğü, sağlamlık, büyük tiplerde üretilebilmesi, mekanik olarak basitlik gibi üstünlükleri vardır. En büyük dezavantajı sabit kısım statorun, reaktif mıknatıslanma akımına olan ihtiyacıdır. Asenkron jeneratörler genel olarak rotor yapılarındaki farklılığa gruplandırılırlar (Dursun ve Binark 2008, Koçak 2010).

2.5.1.2 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör

Sincap kafesli asenkron jeneratörlerde (SKAG); manyetik sesleri azaltmak ve iyi kalkınma momenti elde etmek için, rotor olukları mile paralel olarak değil meyilli olarak açılarak pres alüminyum döküm rotor sargısı elde edilir. Sincap kafesli asenkron makineler, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Sakıncaları; jeneratör parametrelerinin sıcaklık

ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklıktırmasıdır. Moment-hız eğrisi doğrusaldır (Koçak 2010).

Bu sistemde stator sargısı, iki DGM inverterden meydana gelen, dört bölgele güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder. Jeneratör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklıktırması ve stator tarafındaki konverterin, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır (Uçmaz 2008). Şekil 2.16'da Sincap Kafesli Asenkron motor verilmiştir. Resim 2.3'de ise bir santrale ait alternatör fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.16 Sincap Kafesli Asenkron Motor (İnt.Kyn.7).



Resim 2.3 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör (İnt.Kyn.8).

2.5.1.3 Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratör

Bir rotorlu sargılı asenkron jeneratörde; rotorun elektriksel özellikleri dışarıdan kontrol altına alınabilir bunun sonucunda rotor gerilimi değiştirilebilir. Rotorun sargı uçları bu rotorun beraberinde hareket eden bileziklere bağlanırlar. Bilezikler hemen üstündeki sabit haldeki fırçalar desteğiyle, rotor sargıları dışardaki bir kaynağa hatta üç fazlı bir yol verici direncine de bağlanabilir. Süreç sonunda yol alma akımının sınırlandırılmasının yanında hız ayarı da yapılabilir. Bu jeneratörler sincap kafesli asenkron jeneratör kadar sağlam değildir ve pahalıdır (Dursun ve Binark 2008, Koçak 2010). Resim 2.4’de Rotorlu Sargılı Asenkron Jeneratör verilmiştir.



Resim 2.4 Rotor sargılı asenkron jeneratör (İnt.Kyn.9).

2.5.1.4 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör

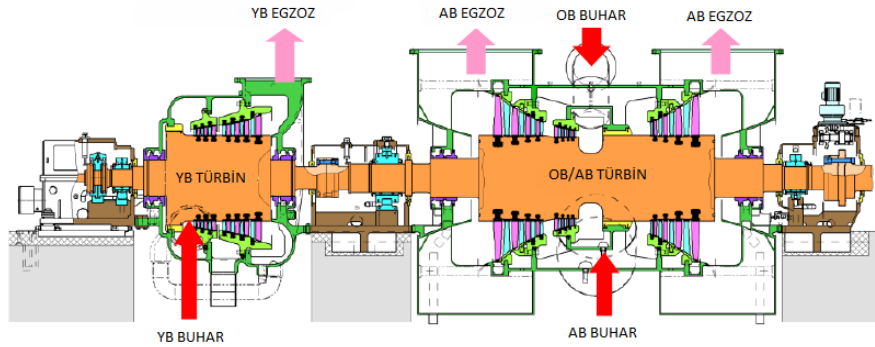
Çift beslemeli asenkron jeneratör stator sargıları direkt olarak sabit frekanslı 3 fazlı şebekeye bağlı bir rotoru sargılı asenkron jeneratör ile rotor sargılarına monte edilmiş iki yönlü IGBT dönüştürücüden meydana gelmiştir. Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve jeneratörün manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder. Çift beslemeli asenkron jeneratörün dezavantajı bilezik tertibatı düzenli olarak bakıma alınmalıdır (Koçak 2010, Dursun ve Binark 2008). Avantajı ise sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan konverter sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %25 'i oranında bir inverter kullanılmaktadır. Bu da inverter maliyetini azaltmaktadır (Uçmaz 2008). Resim 2.5'de bir alternatör parçası verilmiştir.



Resim 2.5 Alternatör parçası (İnt.Kyn.10).

2.5.2 Buhar Türbini

Buhar türbinleri, dünyadaki enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla ortaya çıkmış sistemlerdir. İlk buhar türbini, Charles Parsons tarafından geliştirilmiştir. Buhar türbini, buharın sahip olduğu yüksek bir basınçlı termal enerjinin, mekanik enerjiye çevrildiği sistemlerdir. Bu sistemde bir enerji çevrimi söz konusudur. Şekil 2.17’de bir türbin kesit görünüşü verilmiştir (İnt.Kyn.11).



Şekil 2.17 Türbin kesit görünüşü (Halaçoğlu 2015, Shigeto *at al.* 2015).

Tambura benzer dönen mil; buhar türbininin en mühim parçasıdır ve bu mile rotor denir. Rotor bu sistem içerisine silindir şeklinde koruyucu kılıf altında sabitlenmiş haldedir. Gelen buhar silindir yapıdan geçer sonrasında rotor üzerindeki bileziklerin üzerindeki kanatlara çarpar. Çarpma sonucunda, enerji üretilmiş olur ancak rotor çıkışı

buharın dışarı çıkması engellenmiştir. Buhar türbininde rotor üzerine monte edilmiş birden fazla sayıda bilezik bulunabilir. Bunun sebebi hızla gelen buharın tüm enerjisiyle kanatları hızla döndürmesini sağlamaktır (İnt.Kyn.11). Kanatların hızla dönebilmesi içinse buharın diğer bir bileziğe de aktarılması gerekmektedir. Bu bilezik üzerindeki kanatlı kısma stator adı verilir. Buhar önce rotora ardından statora sonra tekrar rötara aktarılır. Bu döngü devam ederken buharın basıncı düşer ve kapladığı alan artar. Resim 2.6’da bir santral türbini bakımı yapılırken çekilmiş bir fotoğraf verilmiştir.

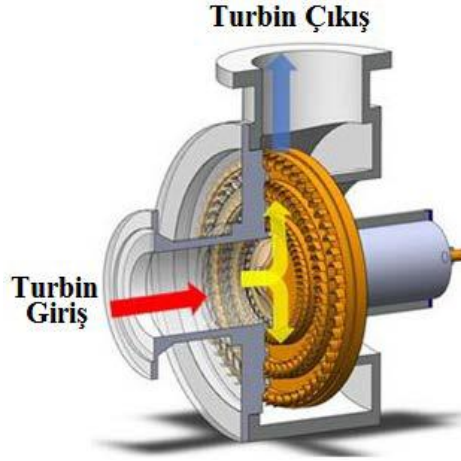


Resim 2.6 Bir santral türbin bakımı (İnt.Kyn.11).

2.5.2.1 Radyal Türbin

Radyal türbinler; 20nci yüzyılda Ljungstrom ve Parsons tarafından geliştirilmiştir (Kıvanç ve Serpen 2011, Şahin 2016).

Radyal türbininde, türbine giren ve türbinde çıkışı verilen sıvı buharının aktarımı Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Sıvı ya da buhar fazındaki akışkan türbin diskine doğrudan merkezden girer ve tek diske sabitlenmiş düzenek üzerinden çevreye doğru (radyal olarak) yayılır.

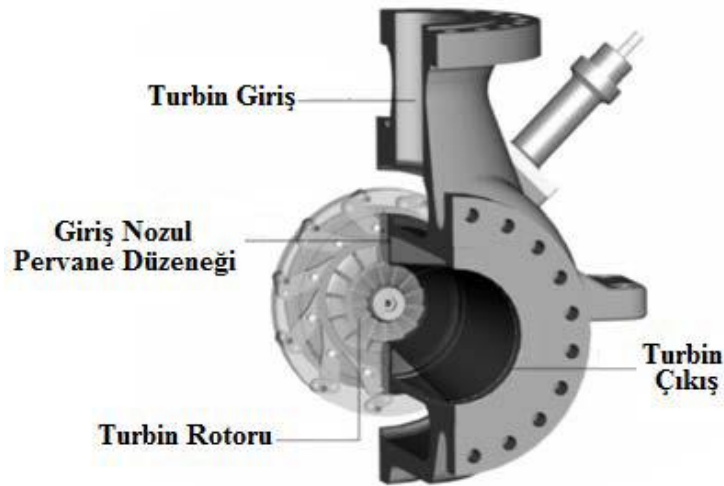


Şekil 2.18 Radyal türbin 3D kesiti (Şahin 2016).

Son rotorun tahliyesinde akıntı radyal bir difüzörün içinden geçer ve sonra tahliye volütü vasıtasıyla ısı eşanjörüne ve/veya sistemin yoğuşma bölümüne iletilir (Şahin 2016).

2.5.2.2 Aksiyal (Eksenel) Türbin

Şekil 2.19’da aksiyal türbinine büyük basınçla gelen buharın aktarımı verilmiştir. Burada buhar bu kez türbin diskine aksiyal olarak üstten girer ve yüksek basıncını türbin kanatçıkları yardımıyla kinetik enerjiye dönüştürmektedir. Buhar buradan türbinin üzerinden iletilir ve sonra tahliye bağlantısıyla eşanjörüne ve/veya sistemin yoğuşturucu bölümüne aktarılır.

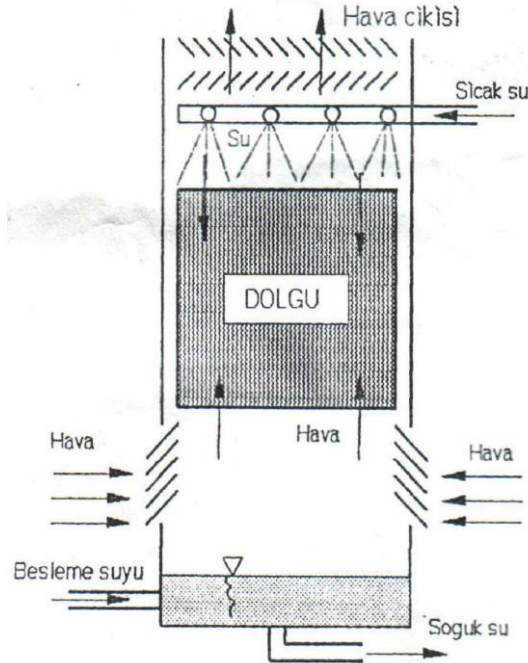


Şekil 2.19 Aksiyal türbin 3D kesiti (Şahin 2016).

2.5.3 Soğutma Kulesi

Soğutma kuleleri; çeşitli işlemlerden geçmiş su veya buharın yeniden doğaya kazandırılması amacıyla kullanılır. Enerji üreten sistemlerde sistem ısısının dengelenmesi amacıyla kullanılan soğutma suları işlemler sürecinde ısı transferine maruz kalır ve ısınır. Isınan bu sular; soğutma kulesinde ısı azaltılarak yeniden kondensere aktarılır. Ters akımlı soğutma kulesinde, sistemdeki suyu soğutmak amacıyla kullanılan hava kulenin alt bölgesinde kuleye girer ve kule üzerinden doğaya kazandırılır (Gönen 2014). Şekil 2.20’de bir soğutma kulesi prensip şeması bulunmaktadır.

Soğutma kulesinin temel prensibi testinin suyu soğutması gibidir. İyi bir testi bir miktar suyu dışına sızdırır ve testi dışına sızan su buharlaşır ve bu süreçte ihtiyacı olan ısıyı testiden alır böylece testi soğutur. Testi örneğinde olduğu gibi soğutma kulesinde de hava ile temas eden suyun bir miktarı buharlaşır ve suyun sıcaklığının azalmasına neden olur. Buharlaşan bu su miktarıyla havanın nem oranı artar. Soğutma kulesinin su havuzu alanına buharlaşan su miktarı kadar su yeniden eklenmelidir (Gönen 2014).



Şekil 2.20 Soğutma kulesi prensip şeması (Gönen 2014).

2.5.4 Kondenserler

Kondenserler temelde sistem içerisinde bulunan akışkanın yoğuşturulması amacıyla kullanılır. Kondenser buzdolaplarının soğutma mantığına benzer yapılardır. Sistem içerisinde gaz ya da sıvı-gaz karışımı halinde bulunan akışkanın veya sistem içerisinde dönüşüm amaçlı bulunan sıvıların soğutulularak gaz halinden sıvı haline geçmesini sağlamaktadır.

2.6 Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretmek Amacıyla Kullanılan Güç Çevrimleri

Jeotermal enerji, dünyanın birçok bölgesinde özellikle plaka sınırlarında veya tektonik olarak aktif bölgelerde bulunan bölgelerde kullanılmaktadır. Artan sayıda bitki ve kapasite faktörlerinde iyileştirmeler, ikili çevrim enerji santrallerinin geliştirilmesi, sondaj ve ekstraksiyon teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle üretim yıllık bazda %3 artmaktadır. Jeotermal gücü değişken enerji kaynaklarına dayanmadığından, örneğin rüzgâr ve ya güneşin aksine, kapasite faktörünün %96'ya kadar oldukça büyük olabileceği gösterilmiştir (Lund 2003, MBuru 2010).

Jeotermal enerji santralleri, akışkan sıcaklığına, basınçlara ve kimyasal özelliklerine göre 3 ana kategoriye ayrılır.

- Yoğuşmalı Enerji Santralleri (Kuru Buhar, Tek veya Çift Flash Sistemleri)
- Geri Basınçlı Türbinler (atmosfere salınım)
- Binary Santraller (düşük sıcaklıklar ve ayrılmış tuzlu su için).

Jeotermal kaynaklar; çeşitli fiziksel özellikler, çevresel faktörler, farklı kimyasal ve termodinamik özellikler içerir. Bu sebeple kullanımı açısından tek tipte bir model bulunmamaktadır (Tamyerli 2007).

Türkiye'de 2018'de jeotermal akışkandan enerji üretmek amacıyla faaliyete geçirilmiş 64 tane ünite vardır. Bu üniteler bağımsız şekilde elektrik elde edilebilen santrallerden oluşmaktadır. Örnek vermek gerekirse; 2 çevrim sistemi ve bir buhar türbinine sahip

santraller 1 ünite olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 2.8’de ülkemizdeki jeotermal santrallerin türleri, bu santrallere ait soğutma sistemleri verilmiştir. Özellikle hava soğutmalı sistemlere sahip jeotermal santrallerde yaz aylarında hava sıcaklığıyla ters orantılı olarak üretim azalmakta ve üretim kayıpları yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra bazı hava soğutmalı jeotermal santrallerde tasarım sıcaklığı azalsa bile diğer sistemlere nazaran %20 daha fazla üretim sağlanabile sistemler bulunmaktadır. Özellikle teknolojik çalışmalar sayesinde son zamanlarda kurulumu yapılan binary sistem kullanan santrallerdeki hava soğutma sistemlerinde hava sıcaklık değerinin artması nedeniyle oluşan değerler için %8 fazla üretimle sınırlanan üniteler bulunmaktadır. Normal binary sistemlere nazaran biraz daha küçük jeneratör ve türbin tercih edilip, ısı değiştirici ve kondenser sistemlerinin kapasitesi azaltılarak maliyetin düşürüldüğü tahmin edilmektedir (Aksoy 2019).

Çizelge 2.8 Türkiye’de santral türleri ve soğutma sistemleri (Aksoy 2019).

SANTRAL TÜRÜ	ÜNİTE SAYISI
Tek buharlaştırmalı (Single Flash)	1
Çift buharlaştırmalı (Double Flash)	2
Bileşik Çevrim (Combined Cycle)	3
Çift Çevrim (Binary)	58
Hava Soğutma	52
Su Soğutma	12

Türkiye’deki jeotermal santrallerin reenjeksiyon sıcaklık değerleri özellikle binary sistem kullanan santraller bazında 70-90°C değerleri aralığındadır. Ayrıca kaynak sıcaklığı daha yüksek değerde olup birleşik çevrim sistemi kullanan jeotermal santrallerde ise reenjeksiyon sıcaklık değeri 110-130°C aralığındadır. Bu reenjeksiyon sıcaklıklarındaki farklılığın temelinde ise silika çökelme sıcaklığı sınır değerindeki değişikliklerdir.

Düşük sıcaklıklı jeotermal sahalardan elektrik enerjisi üretiminde özellikle binary sistemler tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerin reenjeksiyon alanlarında daha fazla güç harcanmasından dolayı iç tüketim değerinde artışla yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra düşük sıcaklıklı alanlarda çift çevrim sistemlerinin tercih edilmesinde de santral veriminin düştüğü gözlemlenmiştir (Aksoy 2019).

Jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminde en önemli faktör kaynak sıcaklığıdır. Sıcak akışkanların çıkarıldığı bu kaynakların farklı özellikleri için uygun güç çevrim sistemi seçilmelidir. Mevcut jeotermal enerjiden, elektrik enerjisi elde edebilmek için çeşitli çevrimler önerilmiştir

2.6.1 Kuru Buhar Çevrimleri

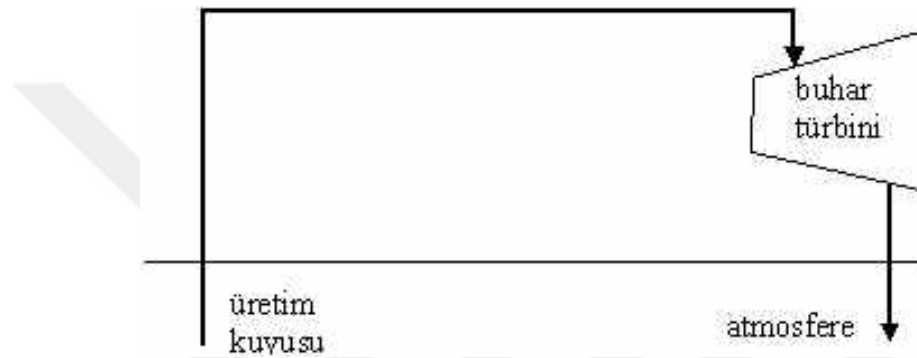
Kuru buhar santralleri; jeotermal santral türlerine bakıldığında en yalın olanıdır. Kuru buhar santralleri; doymuş akışkan sıvılar ya da kızgın jeotermal buharların çıkarıldığı kaynaklarda tercih edilebilir ve dünya üzerinde bu şekilde kaynak sayısı kısıtlıdır (Lund and Freeston 2001, Tamyerli 2007). Jeotermal kaynaktan elde edilen buhar; kuru buhar ya da hafif sıcak buhar standartlarını sağlıyorsa direkt olarak buhar türbinine ya da sistemdeki jeneratör grubuna aktararak elektrik enerjisi elde edilebilir. İtalya'nın ünlü Larderello sahasındaki kaynak ya da ABD'de bulunan The Geysers sıcak su kaynağı kızgın jeotermal kaynağına Resim 2.7'de örnek gösterilebilmektedir (Tamyerli 2007).



Resim 2.7 İtalya- Larderello alanındaki jeotermal kaynak (İnt.Kyn.1).

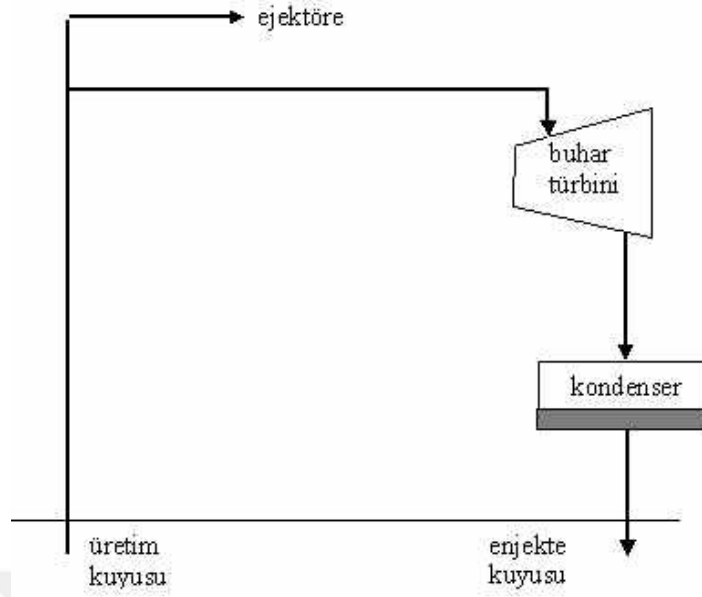
Kondensersiz kuru buhar çevrimi en ekonomik aynı zamanda da en yalın olanıdır. Bu sistemlerde jeotermal kuyulardan elde edilen sıcak buhar; bir sistem aracılığıyla türbine ulaştırılır, buradan da atmosfere dağılımı sağlanır. Sistemde kondenser bulunmaması kondenserli santrallere göre, jeotermal santralin işletme ve kurulum masrafları açısından avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra sistemden elde edilen sıcak akışkan buharının direkt olarak atmosfere verilmesi hava kirliliğine neden olmaktadır (Tamyerli 2007).

Santralin kurulu olduğu alanın atmosfer şartlarından en çok etkilenen sistemler kondensersiz santrallerdir. Örnek vermek gerekirse; rakımın daha fazla olduğu alanlardaki sistemlerde, rakımın daha düşük olduğu alanlardaki sistemlerden elde edilen buhar kalitesine ulaşılması için daha yüksek düzeyde güç üretimi gerekmektedir. Yükseklik arttıkça basınç azalacağından dolayı yüksek rakımlı alanlardaki sistemlerin türbin çıkış basıncı diğer alanlardaki sistem çıkış basıncına oranla düşüktür (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007). Bu sistemlerin basitleştirilmiş akış diyagramı Şekil 2.21’de verilmiştir.



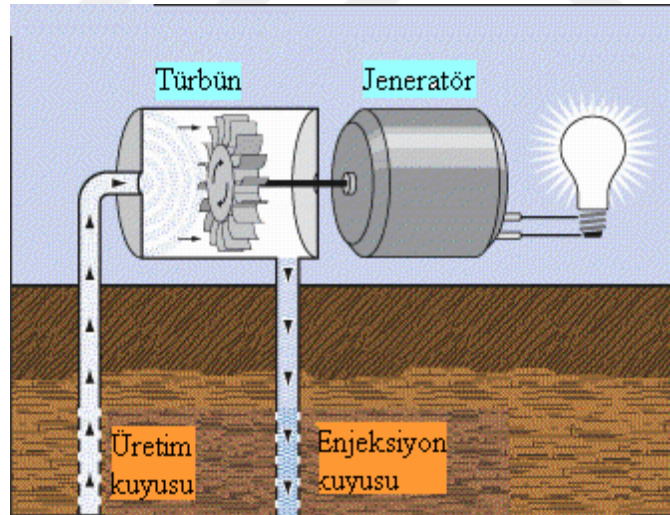
Şekil 2.21 Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış diyagramı (Tamyerli 2007).

Kondenserli sistemlerde, türbin çıkışına kondenser yerleştirilir. Akışkandan elde edilen buhar, türbin içerisinde devrini tamamladıktan sonra çıkışta bir kondensere gelir. Kondenser içerisinde yoğuşturulan bu buhar; görevini tamamladıktan sonra rezervuar alanına aktarılır ya da atık halde bir akarsu aracılığıyla açık havzaya iletilir. Bu süreçte türbin çıkışında normal atmosferik basınç değerinden daha az seviyede bir basınç alanı oluşur. Akışkandan elde edilip işlenen buhar; türbin çıkışında girişindeki sıcaklık ve basınç seviyesi daha da azalmış durumda sistemden ayrılır. Buhar sıcaklığının azalması; buharın ısı enerjisinin sistem içerisinde güce dönüştürülmüş olması demektir. Bu güç sebebiyle kondenserli buhar çevrim sistemlerinde; kondensersiz buhar çevrim sistemine oranla daha yüksek oranda elektrik enerjisi elde edilir (Kanoğlu ve Çengel 1999, Tamyerli 2007). Şekil 2.22’de Kondenserli buhar çevrim sisteminin basitleştirilmiş diyagramı bulunmaktadır.



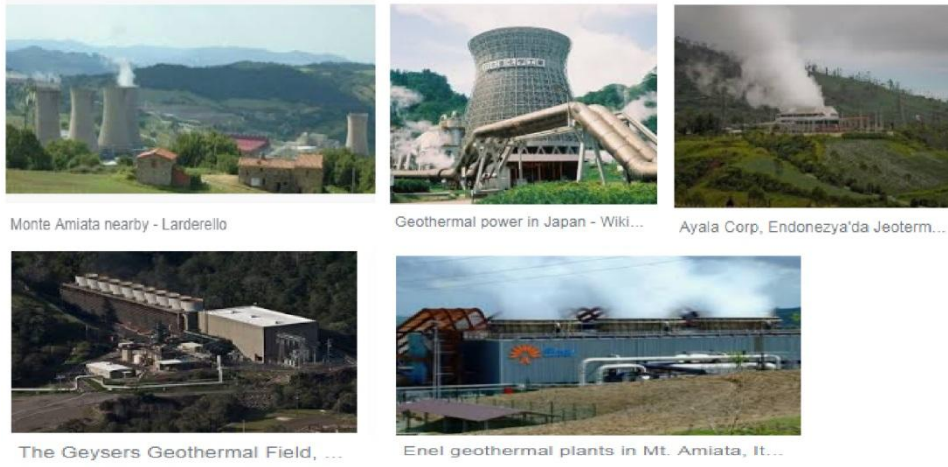
Şekil 2.22 Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış diyagramı (Tamyerli 2007).

Şekil 2.23’de Bir kuru buhar çevrim sisteminde türbin hareketini gösteren basit düzey bir şema bulunmaktadır.



Şekil 2.23 Kuru buhar çevrimi (Şahin 2016).

Dünya üzerinde kurulu jeotermal santraller göz önüne alındığında buradan elde edilen elektrik enerjisinin ortalama olarak yarısı; altı tane buhar ağırlıklı enerji alanından elde edilmektedir. Bunlar: Larderollo (İtalya), Matsukawa (Japonya), Darajat (Endonezya), The Geysers (ABD), Karnojang (Endonezya), Mt. Amiata (İtalya) ‘dır. Resim 2.8’de bu altı sahanın birkaç tanesi verilmiştir.

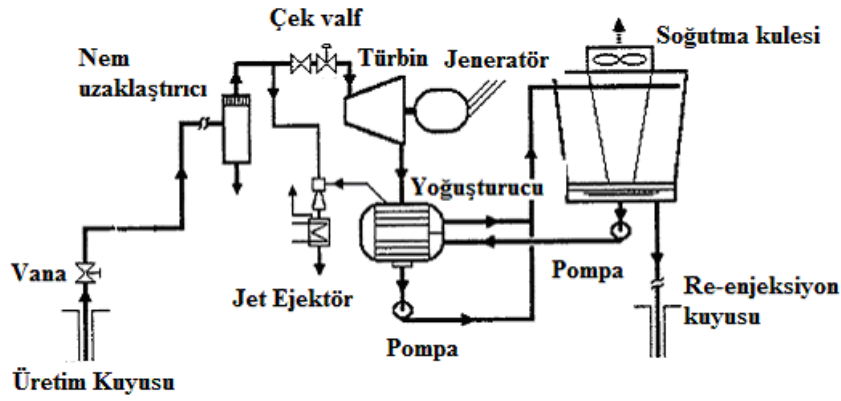


Resim 2.8 Buhar ağırlıklı büyük sahalar.

Bu sisteme sahip alanlardan elde edilen buhar sıcaklığı genel olarak 2800 kJ/kg yani yaklaşık 670 kcal/kg değerlerindedir (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007). Fakat dünya üzerinde bu sistemler gibi yüksek entalpili buhar üretimi sağlayan kaynak sayısı oldukça azdır. Akışkan durumu açısından jeotermal kaynakların %10'u buhar ağırlıklı kaynak, %30'su sıcak su kaynağı iken %60 gibi bir oranı da su ağırlıklı kaynaklardır (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007).

Doğrudan buhar çevrimli bir sistemde 2kWh değerindeki elektrik enerjisini elde edebilmek için ortalama 30-50 kg buhar gerekmektedir. Bu sistemlerin bulunduğu türbinin çıkış gücü kapasitesi, 20MWe-120MWe şeklindedir. 2007 yıllarında 20MWe güç kapasitesi bulunan modüler ünitelerin İtalya'da kullanımı yaygınlaşmıştır. Kondensersiz sistemlerin kullanılabilir olabilmesi için sistem içerisindeki buharda bulunan yoğuşmayan gaz miktarı yüksek olmalıdır. Kondenserde yoğuşmayan gazların bu jeotermal sistemi terk etmesini sağlayabilmek için daha fazla güç harcanması gerekir. Buharlı sistemdeki yoğuşmayan gaz miktarı sistem içeriğinden %15 daha az seviyede ise kondenserli sistemlerden 1KW elektrik elde edebilmek için ihtiyaç olan buhar 7-11kg civarındadır. Sistem girişinde bulunan basınç miktarı düşerse buhar tüketimi yükselmeye başlar. Basınç miktarı azaldıkça buhar tüketimi artacaktır (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007).

Doğrudan buhar santrallerinde saha geliştirme ile gerekli malzemelerin maliyeti de eklenmiş olarak sistem mal oluşu ortalama olarak 2200\$/kW değerindedir. Doğrudan buhar santraline örnek verdiğimiz İtalya Larderello Valle Secolo Santralindeki sistemde buhar sıcaklığı 204°C ve buhar debisi de 111,1 kg/S değerlerindedir ve çıkışında ise 52,2 MWe güç üretimi gerçekleşmektedir (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007). Ayrıca Şekil 2.24’de kuru buhar çevrimi için kullanılabilir bir santral şeması bulunmaktadır.



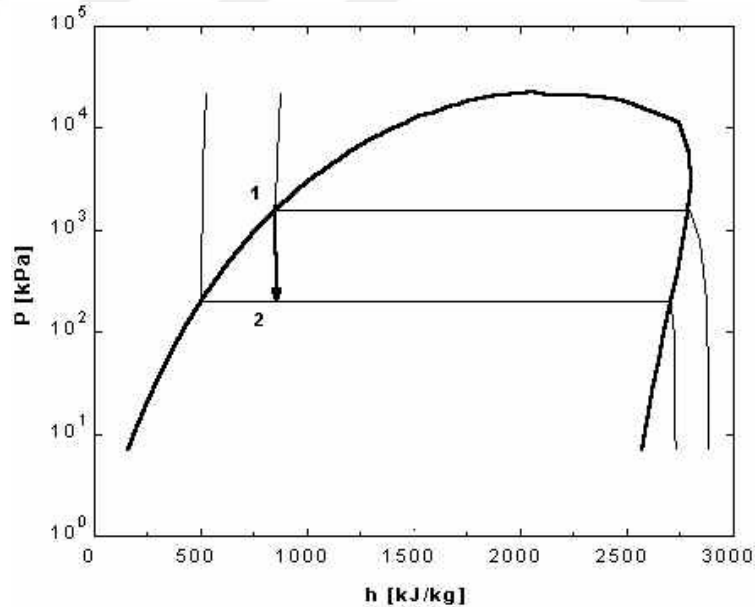
Şekil 2.24 Kuru buhar çevrimi için elektrik üretimini gösteren numune santral diyagramı (Di Pippo 2005, Kıvanç 2010).

Yeraltından elde edilen buhar, türbindeki işleminin ardından gökyüzüne salınır ya da yoğuşturucuya gönderilerek sıvı hale geldikten sonra re-enjeksiyon kuyusuna gönderilerek kaynağa aktarımı sağlanır. Kondenser yardımıyla türbin çıkışında mevcut basınç değeri azaltılarak vakum oluşturulur. Türbin çıkışı buhar sıcaklığı azalmış olur (Atalay 2004, Kıvanç 2010). Bunun sonucunda da türbinin giriş sıcaklığı ile türbin çıkış sıcaklığı arasındaki fark yükseleceğinden buradan kazanılacak güç de maksimum değere varacaktır.

2.6.2 Tek ve Çift Püskürtmeli Çevrimler

Santrallerde kullanılan jeotermal akışkanın bütününe buhar formunda bulunması çok zordur. Yer altından yüzeye ulaşan akışkanlar genel olarak doymuş sıvı-buhar karışımı şeklindedir ve bu nedenle de akışkan karışımındaki buhar oranı fazla ise bu buhar karışımdan ayrıştırılarak sistem üzerinden buhar türbine aktarılırken sıvı karışım yeniden çıkış alanına reenjekte edilir. Ancak bunun tersi yani buhar oranının az sıvı

karişim oranının fazla olduğu ya da akışkanın tamamının sıvı halde olduğu durumlarda püskürtmeli buhar çevrim sistemleri devreye girmektedir. Sıvı karişim için uygulanan püskürtme işlemi; sistem içerisinde püskürtme havuzu olarak adlandırılan alanda kısılma vanaları sistematiiyle meydana gelir. Sıvı akışkan yapının püskürtme havuzu çıkış basıncı değerindeki düşüklüğe nazaran sıcaklığın giriş değerinin eşit olması sonucunda akışkanın bir miktarı buharlaşır. Püskürtme işleminin ardından sıvı karişımın sıcaklık değerinde azalma meydana gelir. Elde edilen son sıcaklık değeri, gerçekleştirilen işlem sonrası basıncın doyma entalpisidir (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007). Püskürtme süreci sıcaklık sabitleme sürecidir. Süreç bitiminde genel olarak buhar kuruluk seviyesi 0,10-0,50 değerleri aralığında olmalıdır. Kuyu ağzı basıncı değeri, rezervuar alanındaki akışkan sıvının ısıl şartları ve kuyu ebatları bu elde edilen kuru buharın kuruluk seviyesini etkileyen ana etmenlerdir (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007). şekil 2.25’de Püskürtme işlemi sırasında suyun basıncı-sıcaklık diyagramı verilmiştir. şekildeki eğride su; (1) olarak adlandırılan kısımda doymuş sıvı halde iken, (2) olarak adlandırılan kısımda ise doymuş halde sıvı-buhar karişımı şeklindedir (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007).

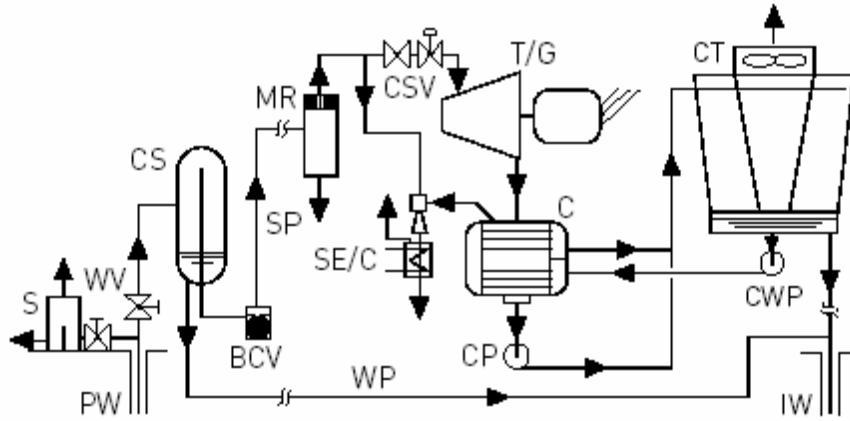


şekil 2.25 Püskürtme işlemi sırasında suyun basıncı-sıcaklık diyagramı (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007).

Jeotermal kaynaklarda püskürtmeli çevrim seçiminde; jeotermal santral güç kapasitesi, kullanılacak ekipmanların doğru seçimi, jeotermal kaynak özellikleri ve termodinamik-

ekonomik standardizasyon verileri göz önünde bulundurulması gereken temel özelliklerdir. Püskürtme çevrim sistemi kullanacak jeotermallerin kurulum ücreti ortalama olarak 1700-2100 \$/kW değerleri aralığındadır ayrıca bu değerlere saha inceleme ve kullanılacak donanım seçimi de ilave edilerek hesaplanır. Genel olarak bakıldığında püskürtme çevrimli santraller; kaynak ağız basınç değeri yüksek olan sahalar için tercih edilmektedir. Ancak kaynak ağız basınç değeri düşük olan sahalar için de kullanılabilir püskürtme tipleri hakkında çalışmalar yapılmaktadır (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).

Çift fazlı sıvı akışkan püskürtme süreci bitiminde seperatöre iletilir. Seperatör içerisinde bazı işlemlerden geçen sıvı-buhar karışımı haldeki akışkan buhar fazı ve sıvı fazı olmak üzere ayrıştırılır. Siklon ayrıştırıcıları farklı fazlardaki bu buhar ve sıvının yoğunlukları arasındaki uçurumu değerlendirerek çevrim sistemi ile bunları birbirinden ayırır. Bu seperatörler kurulum derecesi %99,9'a ulaşan buhar ayrışımı sağlayabilmektedir. Seperatör çıkışındaki buhar, türbin kullanılarak mekanik enerjiye dönüştürülür. Elde edilen bu mekanik enerji; şaft mili yardımıyla jeneratörde dönme meydana gelmesine neden olur ve elektrik enerjisi elde edilir yapılmaktadır (Tamyerli 2007). Şekil 2.26'den de anlaşılacağı üzere; buhar-sıvı karışımından ayrıştırılan buhar türbine iletilirken ayrışma sonucu elde edilen sıvı da rezervuar alanına reenjekte edilir. Jeneratör çıkışında ıslak haldeki buhar; püskürtme havuzunda kullanılmış soğutucu sıvı ile yoğuşurma işlemine tabi tutulur ve sıvılaştırılan bu buhar rezervuar alanına iletilir. Eğer jeotermal santral yakınlarında akarsu ya da kapalı havza su birikintisi şeklinde soğuk sıvı bulunuyorsa; püskürtme havuzlarında bu soğuk sıvılar da soğutma işlemleri için alternatif sistem olarak değerlendirilebilir. Genel olarak kondenserli buhar çevrim sistemlerinde; buhar enjektörleri kondenser sistem içerisinde vakumlama işlemlerini gerçekleştirmektedir.



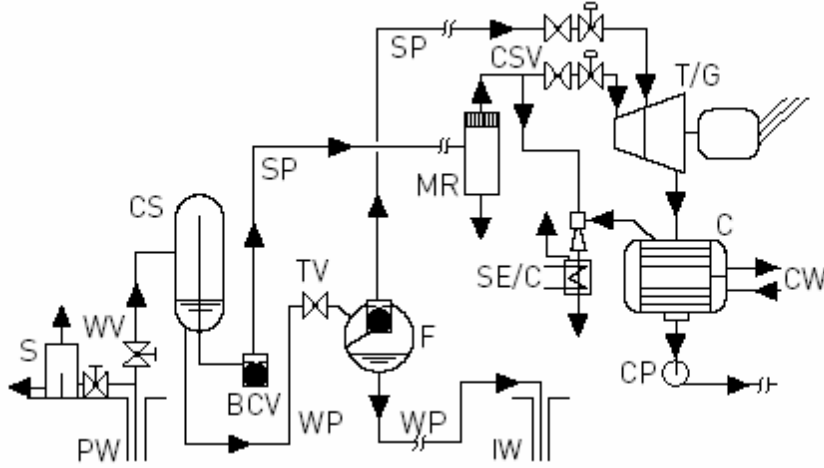
Şekil 2.26 Jeotermal elektrik santrali tek püskürtmeli çevrim akış diyagramı (Di Pippo 2005, Tamyerli 2007).

Böylesi jeotermal santraller ile doğrudan buharlı jeotermal santraller karşılaştırıldığında asıl farklılık her iki santral çıkışında üretilmiş olan sıvı miktarıdır. Misal vermek gerekirse 55MWe değerinde güç eldesinde; püskürtme çevrim sistemli santral çıkışında 630kg/s sıvı reenjekte edilirken, doğrudan buhar santrallerinde 55MWe değerinde güç eldesinde 20 kg/s sıvı reenjekte edilir. Bu değer 1/30 oranlarına denk gelmektedir. Jeotermal santrallerde kullanılan sıvı-buhar karışımı işlem sonrası yoğunlaştırılarak elde edilen sıvı atık miktarının tamamının rezervuar alanına yeniden aktarılması gerçekleşse; tek püskürtmeli sistemden elde edilen miktarın ortalama %90'a yakını rezervuar alanına aktarılabilirken, doğrudan buharlı sistemlerde bu miktar ortalama %15 civarındadır (Tamyerli 2007). Elde edilen verilere göre kaynak ve rezervuar alanının verimliliği bakımından tek püskürtmeli santral sistemleri direkt buhar sistemlerine nazaran daha çok tercih edilmelidir.

Bu şekilde çalışan santrallere de ülkemizde rastlanabilmektedir. Kızıldere jeotermal santrali kaynak çıkış sıcaklığı 200 °C ve 264 kg/s debisindeki sıvı akışkandan 8-12 MWe civarında güç elde etmektedir. Ancak bu jeotermal santralde akışkan atık yeniden kaynak alana reenjekte edilememektedir. Kullanılan akışkan atığın rezervuar alanına reenjekte edilmesi, rezervuar alanının kullanım ömrü açısından önem arz etmektedir.

Jeotermal santrallerde yüzeye çıkarılan akışkan sıcaklığının fazla olması halinde püskürtme işlemleri tekrarlanabilir. İlk püskürtme işlemi bitiminde oluşan sıcak buhar elektrik enerjisi üretimi için türbine iletilirken, artan sıvının sıcaklık hatta basınç

değerleri tekrar püskürtme işlemi için elverişli ise bu akışkan ikinci kez püskürtme işlemine tabi tutulur (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007). Şekil 2.27'de çift püskürtme çevrim sistemli jeotermal santral diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 2.27 Jeotermal elektrik santrali çift püskürtmeli çevrim akış diyagramı (Di Pippo 2005, Tamyerli 2007).

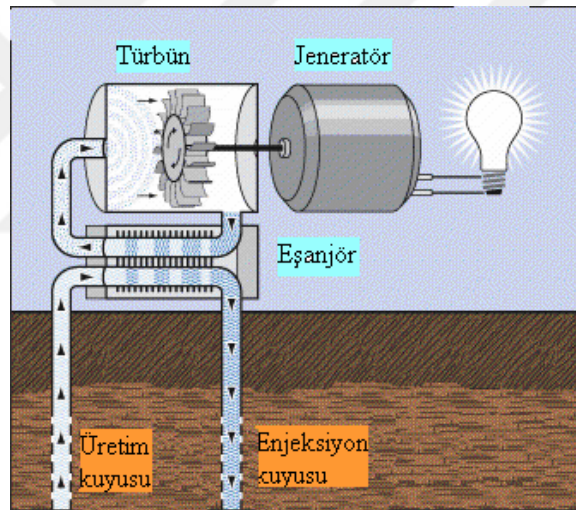
Şekilden de anlaşılacağı gibi akışkan sıvının belirli kısmı buhar şekline dönüşür ve elektrik enerjisi elde edebilmek için türbine aktarılır. Ancak ikinci püskürtme sonucu gelen buharın basınç değeri ilk püskürtme sonucundaki değerinden daha alt seviyede olması durumu söz konusudur. Bu durumda düşük değerdeki bu buharın enerji elde edilecek türbine daha alt seviyede bir basınç değeriyle alınması gerekmektedir. Bu gibi durumlar için jeotermal santrallerde daha alt seviyede basınçla gelen buharlar için alternatif türbin sistemleri de değerlendirilebilir. Püskürtme adedine bakılarak bu sistemler tek ve çift püskürtmeli sistemler şeklinde ikiye ayrılırlar (Kanoğlu 2005, Tamyerli 2007). Eş değerdeki sıvı debisi bakımından; çift püskürtmeli çevrim sistemlerinden elde edilecek güç tek püskürtmeli çevrim sisteminden elde edilecek güce oranla %20-25 değerinde artış gösterir ayrılırlar (Tamyerli 2007).

Püskürtme basınçlarının santral çalışma verimliliği ve santral kurulum ekonomisi bakımında önemi büyüktür. Bu sebeple de çıkış basınç seviyelerinin ekonomik sınırlar içerisinde kalabilmesi ayrıca sistemin kurulacağı alanın çevresel donanımının çok iyi araştırılması gerekmektedir (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007). Araştırmanın yeterli

yapılamaması durumunda ikinci püskürtme işlemi sonrası sisteme gelecek ek masraflar sistem verimliliğini ve ekonomik dengeyi bozabilir.

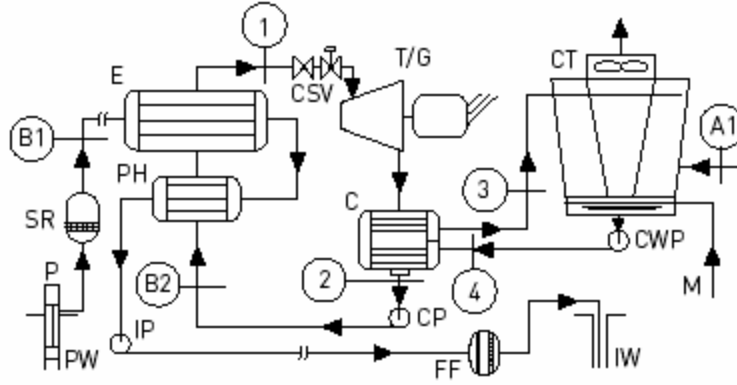
2.6.3 Binary (ikincil) Çevrimler

Jeotermal kaynaktan enerji üretim sürecinde akışkanın düşük entalpide veya buhar fazının az olması durumunda binary (ikincil) çevrim sistemleri kullanılmaktadır. Binary sistemlerde türbin içerisinden ilerleyen atık sadece buhar olmayıp, ikincil akışkan olarak nitelendirilen ve kaynama sıcaklığı 100 °C'nin altındaki seviyede sıvılardır. Binary sistemde yer altından çıkarılan akışkan bu sistemin ısı kaynağıdır. Binary sistemlerinde sıklıkla tercih edilen ikincil akışkanlar; izopentan, R-114, izobütan ve pentandır. Şekil 2.28'de sistemin sadeleştirilmiş akış şeması bulunmaktadır (Tamyerli 2007).



Şekil 2.28 Binary çevrim jeotermal santral (Şahin 2016).

Şekil 2.29'de bir binary çevrim sistemine ait sadeleştirilmiş akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.29 Binary sistem jeotermal santralinin sadeleştirilmiş akış şeması (Di Pippo 2005, Tamyerli 2007).

Jeotermal sıvının kuyu ağzında uygulanan basınç seviyesi olabildiğince yüksek değerde sabitlenebilirse akışkanın yüzeye sıvı şekilde çıkması sağlanabilir. Bu duruma sebep ise; rezervuar alanına akışkan akışını sağlayan pompaların çoğunlukla sıvı aktarımına uygun özellikte olması ve bu pompaların akışkan sıvı iken harcadığı gücün diğer duruma nazaran daha az olmasıdır. Jeotermal akışkan sıvı havuz içerisinde bazı cihazlardan geçerken ısı transferine maruz kalır ve bu alanda kaybedilen ısı diğer taraftaki ikincil akışkana aktarılır. Bunun sonucunda jeotermal akışkan havuz alanından daha az sıcaklık değeriyle ayrılır ve rezervuar alanına aktarılır. İkincil akışkan ise diğer akışkandan devraldığı ısı sayesinde neredeyse bütünüyle buhar fazına geçer ve ortamından doymuş ya da buhar şeklinde ayrılır. Bu faz değiştiren kızgın buhar; türbinden geçtiğinde milin hareket etmesine neden olur. Böylece sistemdeki ısı enerjisi otomatik olarak mekanik enerjiye dönüştürülmüş olur. Türbin milinin hareket etmesiyle birlikte ona bağlı olan jeneratör mili de hareket eder ve böylece mekanik enerji de elektrik enerjisine çevrilmiş olur. Türbin çıkışında sıcaklığı ve basıncı azalmış olan akışkan kondensere aktarılır ve burada yoğruşturulur. Yoğruşturulan bu akışkanın basınç değerinin artırılabilmesi için bir pompaya ihtiyaç vardır ve basınç değeri artan akışkan ısı transfer alanına aktarılır. Bu olay sonucunda ikincil akışkan bir çevrim sistemini tamamlar. Rankine Çevrimi olarak adlandırılan sistem normalde ikincil akışkanın sistem içerisindeki hareketidir. Jeotermal akışkanın sıcaklığı; Rankine Çevrimi sisteminin ısı kaynağıdır. Yer altından çıkarılan bu akışkanın termodinamik özellikleri sistem çalışma standartlarını doğrudan etkiler. Bu nedenle de jeotermal kaynaktan verimin fazlaca alınacağı gücün elde edilebilmesine olanak sağlayan ve standartlara daha yakın ikincil akışkan tercih

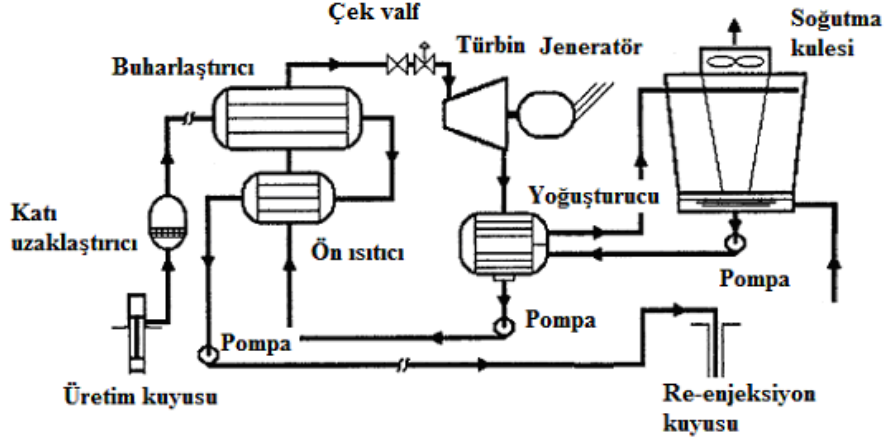
edilmelidir. Kondenser içerisinde soğutma işlemlerinde çoğunlukla hava tercih edilir. Jeotermal santralin kurulum alanı sıcak su kaynağının çıktığı yer olması nedeniyle santral yakınlarında nehir ya da kapalı havza su birikintisi bulunmuyorsa bunların yardımıyla soğutma çoğu zaman gerçekleştirilemeyebilir. Havanın sistem içerisinde soğutma işlemi için tercih edilmesinin temel sebebi doğa dostu olması iken iklim şartları göz önüne alındığında özellikle haziran, temmuz ve ağustos gibi sıcaklığın yüksek olduğu aylarda sistem verimini olumlu etkilememektedir (Kanoğlu ve Çengel 1999, Tamyerli 2007).

Binary santrallerin ortalama güç kapasiteleri; 100kWe ile 3MWe aralığındadır. 10-50MWe ve daha yüksek güç kapasiteli jeotermal santraller için tek bir sistem yeterli olmayıp ilave sistemler de eklenebilir. Akışkan sıcaklık değerlerinin az olması sebebiyle binary çevrim sistemlerinin ısıl verimleri %10-%17 aralığındadır. Buna rağmen dünyada birçok bölgedeki düşük entalpili sıcak su alanlarından elektrik enerjisi elde edilebilmesi için binary çevriminin tercih edilmesinin asıl sebebi güvenilir ve ekonomik olmasıdır (Barbier 2002, Tamyerli 2007).

Binary çevrim sistemlerinin kullanıldığı santrallerin kurulum maliyetleri diğer sistemlerin kullanıldığı santrallere nazaran daha pahalıdır ve sistem ekipmanları ile saha optimizasyonu bu rakamlara eklenmiş haliyle bu ortalama 2400\$/kW civarındadır. Ancak binary sistemin işletme ve sistem bakım masrafları diğer sistemlere oranla daha azdır (Kanoğlu ve Çengel 1999, Tamyerli 2007). İkincil sistemler, çevre dostu temiz enerji sistemleridir. İkincil çevrimlerde jeotermal akışkanın yapısından kaynaklanan korozif etkilerin yanı sıra kabuk oluşturma problemleri diğer sistemlere nazaran daha az gelişir. İkincil çevrimde jeotermal akışkanın, santral içerisindeki ilerleme sürecinde sistem elemanlarına temas etmemesi nedeniyle sistem içerisindeki malzemeler korozif etkilerden etkilenmemiş olur (Tamyerli 2007).

Binary sistemler; diğer sistemlere nazaran kuru tip soğutma işlemi için elverişlidir. Hidrokarbonların buhar yoğunluk oranlarının fazlalığı bu soğutmayı kolaylaştırmaktadır. Hidrokarbonların donma noktalarının çok yüksek olması sebebiyle hava sıcaklığının düşük olduğu santral sahalarında çok daha yüksek performans

sergilerler (Barbier 2002, Tamyerli 2007). Şekil 2.30’da temel olarak binary çevrim jeotermal elektrik santrali örnek şeması görülmektedir (Kıvanç 2010).

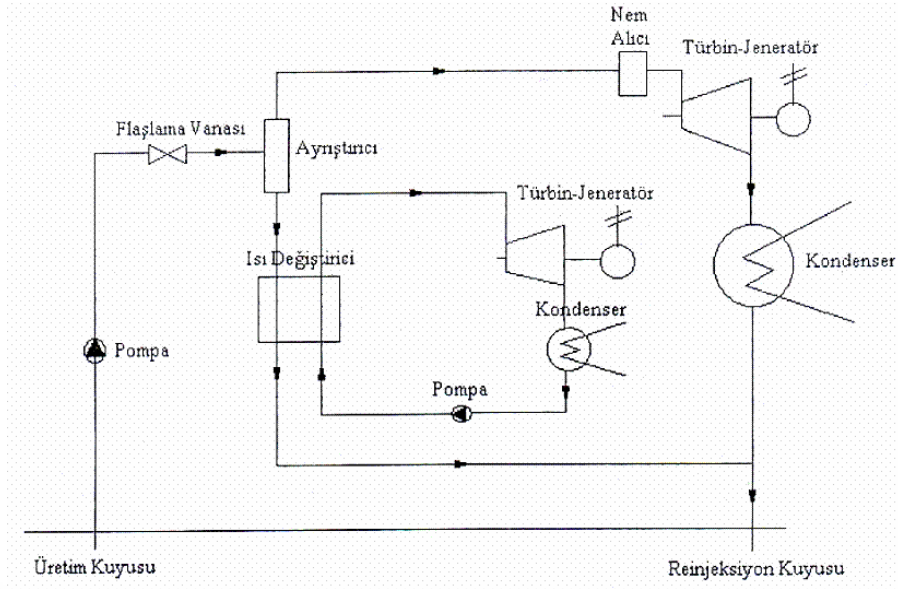


Şekil 2.30 Binary çevrim örnek jeotermal elektrik santrali (Di Pippo 2005, Kıvanç 2010).

Binary sistemlerin yoğuşmayan gazlara dair hassasiyeti yoktur bu nedenle performansları bu gazlara tabii değildir.

2.6.4 Kombine Tek Püskürtmeli - Binary (İkincil) Çevrimler

Kombine tek püskürtmeli sistemde, ikincil sistemdeki işlemlere benzer şekilde; sistemin uygun bir yerinde kullanılan araçlarla akışkanı buharlaştırmak için tercih edilir. Bunun için sistemde ayrıştırıcıdan ayrılan akışkan ısı transferine maruz kalır. Böylece jeotermal akışkanın mevcut enerjisinden daha fazla faydalanılır. Kombine Tek Püskürtmeli çevrim sistemi, çift püskürtmeli sisteme alternatif olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.31’da sistemin basitleştirilmiş akış diyagramı bulunmaktadır (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).



Şekil 2.31 Kombine tek püskürtmeli-binary sistem jeotermal elektrik santralinin akış şeması (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).

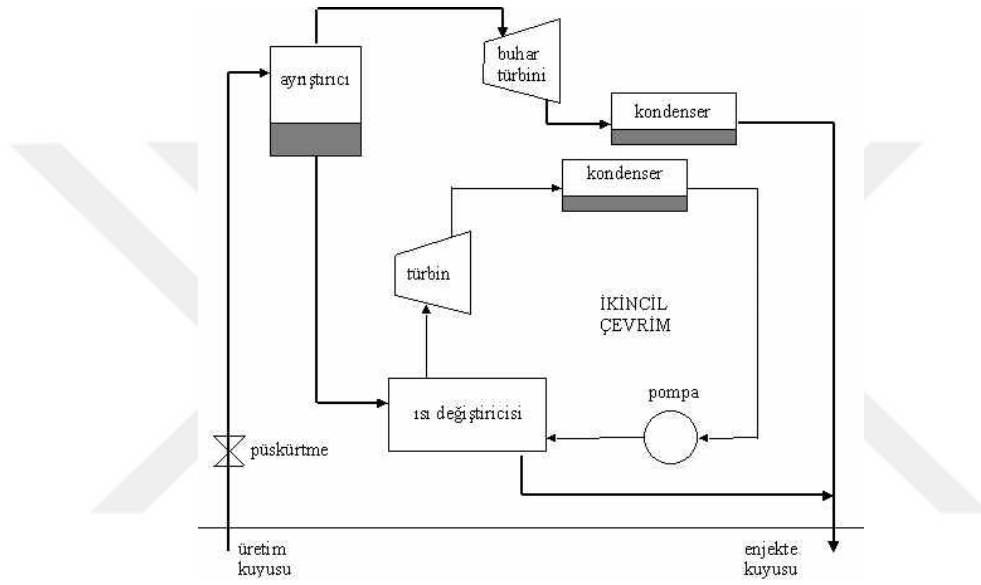
Ayrıştırıcı içerisinde çıkan akışkan sıvıda mevcut bulunan çözülmüş madde miktarının yüksek olması sistemde püskürtme işlemi için doğru süreci oluşturmamaktadır. Bunun sebebi akışkan sıvının düşük basınç değeriyle püskürtülmesi sürecinde sistem ekipmanları üzerinde kabuklaşma oluşturması ve bunun da sisteme zarar vermesidir. Böylesi bir durumda da sisteme binary sisteminin eklenmesi doğru bir seçimdir. Bunların yanı sıra çift püskürtmeli sisteme nazaran, bu sistemin kurulum, işletim masrafları ekonomik kalmaktadır. Literatürde bu jeotermal sisteme verilebilecek örneğe rastlanamamıştır (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).

2.6.5 Birleşik Püskürtmeli Binary (İkincil) Çevrimler

Elektrik enerjisi üretiminde son zamanlarda oldukça kullanımı artan diğer çevrim sistemi de birleşik püskürtmeli binary sistemdir. Birleşik püskürtmeli çevrim sisteminin asıl amacı, püskürtmeli ve binary sistemin mevcut avantajlarından ortak şekilde faydalanmaktır. Birleşik püskürtmeli sistem; yüksek entalpili kaynaklar açısından kullanışlıdır, bu sebeple çift püskürtmeli sistemlere alternatiftir.

Jeotermal akışkan, sistem içerisinde püskürtme havuzundaki işlemi tamamlandıktan sonra oluşan buhar türbinine iletilir. Buhar türbinin jeneratörü hareketlendirmesiyle elektrik enerjisi

elde edilir. Görevini tamamlayan buhar kondenserde yoğuşturulur, yeniden elde edilen jeotermal akışkan rezervuar alanına reenjekte edilir. Püskürtme havuzu işlemleri bitiminde atık madde, sıcaklık transferine maruz kalarak ısı enerjisini diğer taraftaki ikincil akışkana aktarır, sonrasında rezervuar alanına reenjekte edilir. İkincil akışkan bu işlemlerde ikincil çevrim türbinindeki sürecinin bitimiyle elektrik enerjisine ulaşılır, sistem döngüsü sona erer. Şekil 2.321'de Birleşik-püskürtmeli çevrim sisteminden elektrik enerjisi üretimi akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.32 Birleşik püskürtmeli-binary sistem jeotermal elektrik santralinin akış şeması (Di Pippo 2005, Tamyerli 2007).

Birleşik çevrim sisteminde buhar ile ikincil akışkan farklı türbinlerden geçerler. Denk jeotermal kaynakları tercih eden çift püskürtmeli sistemler, birleşik püskürtmeli sistemler kıyaslandığında; ikinci sistemin elde ettiği elektrik enerjisinin yüksek olduğu gözlemlenir. Buna karşın birinci sistemin kurulum, işletme masrafları diğerine nazaran düşüktür. Sistem işlemleri süresince akışkan sıvı halde olduğundan kabuklaşma problemleri azalmaktadır. Bir sıcak su kaynağından elektrik enerjisi elde edilmek isteniyorsa sistem tercihi için detaylı analizler yapılması gerekmektedir.

Stillwater-Kuzey Nevada eyaletinde bu sistem ile çalışan jeotermal santral kurulmuştur. Santral içerisinde Şekildeki sistemden toplam olarak 7 özdeş ünite bulunmaktadır. Jeotermal santral 12,4MWe değerinde güç üretimi yapmaktadır. Binary çevriminde izopentan madde jeotermal akışkanla birlikte görev almaktadır. Jeotermal santralin

kondenseri olarak hava soğutmalı kondenser kullanılmaktadır (Kanoğlu 2002, Tamyerli 2007).

2.6.6 Kalina Çevrimi

Dr. Alexander Kalina adlı mühendis tarafından tasarlanmış olan sistem aslında binary sistemidir. Kalina sisteminde kullanılan amonyak-su karışımı diğer sistemlerden farkını oluşturur. Kalina çevriminde orta sıcaklıklı ve düşük sıcaklıklı sıcak su kaynaklarından yüksek verimde enerji elde edilmesi hedeflenmektedir. Buhar türbini, pompa, yoğuşurma ortamı, reküperatör, jeneratör, ayırıştırıcı ve buharlaştırıcı bu sistemin ana ekipmanlarıdır. Kalina çevriminde amonyak-su karışımı temelde jeotermal akışkan olarak seçilmektedir. Sistem kazancı; buharlaştırma alanındaki sıcaklık transferi süreci ile yoğuşurma alanındaki sıcaklık deşarj sürecinden oluşur. Bunun yanı sıra reküperatör sayesinde ek olarak ısı kazancı da sisteme eklenir. Sistem içi akışkan seçiminde amonyak-su bazı tercih edilmesi, bu bazın değişken yoğunlaşma ayrıca buharlaşma noktasına haiz olması sistemin temel avantajını oluşturur (Henry and Mlcak 2001, Serpen 2003, Tamyerli 2007).

Binary çevrim sistemlerinden elde edilen elektrik enerjisinden daha fazlası Kalina çevriminden elde edilir. Bunun nedeni sistemde kullanılan karışımdan ayrı buharlaşma, yoğuşma, reküperasyon sürecidir.

Jeotermal akışkandan elde edilen enerji ekipman çıkışında direkt olarak yararlı düzeyde enerjiye çevrilmiyorsa sıcak akışkanın sıcaklık değişim çanına daha uygun olan akışkan haline dönüştürmek gerekir. Bu adı geçen özelliğe yakın olan akışkan yapı amonyok-su karışımıdır. Jeotermal akışkan çevrim içerisinde sisteme enerji katarken ısı sıcaklığı buna denk şekilde azalır. Saf su 100 °C noktasında buharlaşırken amonyak-su karışımının belirli bir buharlaşma noktası bulunmaz karışımın oranı bu noktayı belirler.

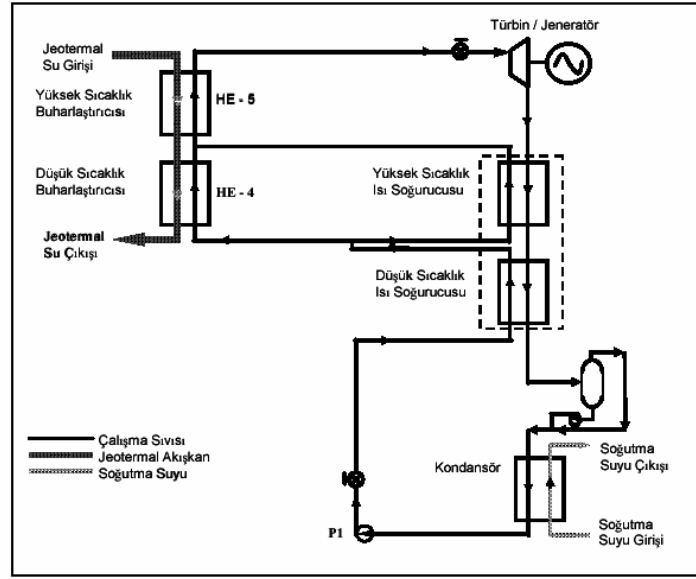
Kalina çevrimde kullanılan bazın buharlaşma sürecindeki gösterdiği sıcaklık farklılaşım yayıyla jeotermal akışkanın sıcaklık azalma sürecindeki sıcaklık farklılaşım yayı doğru

orantılıdır. Bu orantılık sistem içerisindeki enerji transferinde elde edilen verimliliğin temelini oluşturur.

Bunun yanı sıra buharlaştırma ünitesinde amonyak-su bazının yalnızca %75 'lik kısmının buharlaştığı bilinmektedir. Bu buharlaşma jeotermal santral verimini yükseltirken, yukarıda bahsedilen sıcaklık değişim yayları arasındaki bölgenin farklılaşmamasını sağlar (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).

Kalina sistemde; amonyak-su bazının yoğuşma süreci değişken ısı noktalarında gerçekleşirken, binary sistemde direkt kullanılan akışkanın yoğuşma süreci belirli bir ısı noktasında gerçekleşir. Sıvı bazın yoğuşma noktası değerinin belirli olmamasından dolayı ters akışlı yoğuşturucu sistemde kalina bazının yoğuşma noktasındaki değeri soğutucu sıvının çıkış ısı değerinden de az görülebilir. Bu durum sistem içerisinde türbin çıkış basıncı değerinin düşmesine neden olur. Hâlbuki katışıksız Organik Rankine Çevrim (ORC) akışkan belirli sıcaklık değerinde yoğuştuğundan, sıvının kondenser ısı değeri, sistemdeki soğutma sıvısının değerinden yüksekte kalmalıdır. Böylesi sistemlerde, kalina çevrimine nispeten fazlaca oranda türbin çıkış basıncı gerçekleşmekte ve fazlaca soğutucu sıvının sisteme aktarılması süreci oluşur. Bu da sistem veriminin düşmesine neden olur.

Kalina çevrim sistemleri dışındaki sistemlerde de gerçekleştiği gibi, türbin bitimindeki çürük buhar yoğuşturulmaktadır. Ancak türbin çıkışında sıvı karışımın mevcut enerjisinin belli miktarı buharlaştırıcı üniteye geçecek olan temel akışkan maddeye aktarılabilir. Sıvı karışımın farklılık gösteren yoğuşma sıcaklığı, sistemdeki reküperatörde gerçekleşecek ısı aktarımında sıcaklık değişimini oluşturur. Reküperatörde gerçekleşen işlemlerle, güç transfer veriminin artmasını ilaveten çevresel ısıtmada yararlanılacak olan jeotermal sıvı sıcaklığının olması gerekenin üzerine çıkmasına neden olur. Bu avantajların elde edilmesi ORC güç santrallerindeki jeotermal akışkan ile gerçekleştirilemez. Kalina çevrimli bir sisteme ait diyagram Şekil 2.33'de görülmektedir.



Şekil 2.33 Kalina çevrimli jeotermal elektrik santralinin akış diyagramı (Serpen 2003, Tamyerli 2007).

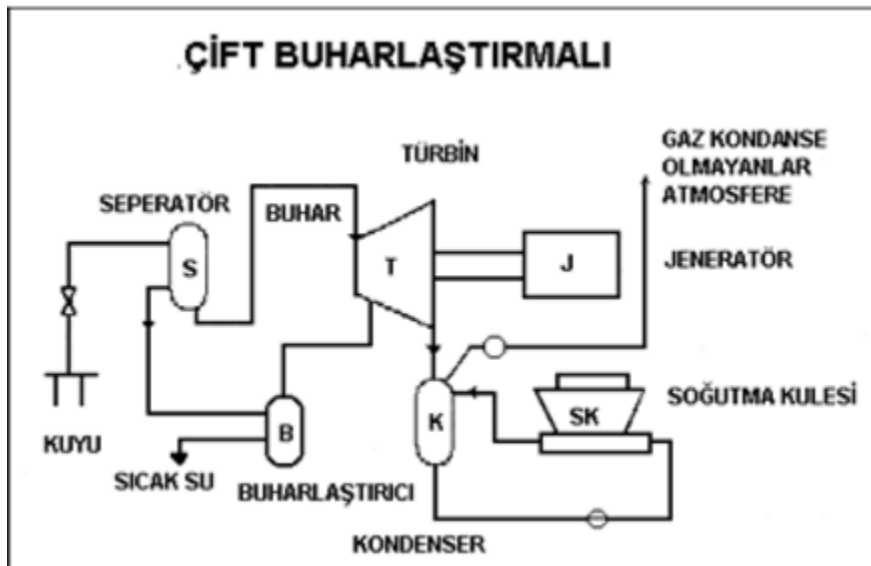
Su soğutmalı yoğuşturucu bitimindeki sıvı akışkan kalina çevrim amonyak-su bazıdır. Doymuş sıvı şartlarındaki bu amonyak-su karışımının düşük seviyedeki basıncı pompa yardımıyla artırılır. Basınç seviyesi yükselen sıvı, önce alçak sıcaklık reküperatörüne ardından da yüksek sıcaklık reküperatörüne gönderilerek buharlaştırıcı öncesi ısı değişimine maruz kalır. Buharlaştırıcı ünitesine gelen jeotermal akışkan ısı aktarımı sonrasında yüksek oranda buharlaşır. Bu oran %75 buhar ve %25 sıvı karışımı şeklindedir. Elde edilen çift fazlı akışkan karışım, sonuçta tam olarak buhar ve sıvı olacak şekilde ayrıştırıcıya aktarılır. Bu işlem sonunda sıvı akışkanın sahip olduğu amonyak oranı düşük iken, buhar fazdaki akışkanın sahip olduğu amonyak oranı fazladır. Buradaki buharın amonyak oranının yüksek olması basıncının da yüksek olmasına neden olur. Bu buhar türbinde genişir ve basıncı azalmış şekilde türbinden ayrılır (Henry and Mlcak 2001, Tamyerli 2007).

Ayrıştırıcının ardından amonyak oranı alçak olan sıvı akışkan mevcut ısı enerjisini reküperatördeki ana akışkana transfer eder. Reküperatörden ayrılan akışkan, alçak sıcaklık reküperatörüne aktarılır ve türbindeki amonyak oranı yüksek buhar ile birleştirilir. Birleşim sırasında akışkan ve buhar karışır. Sonuç olarak başlangıçtaki amonyak-su bazı yeniden elde edilmiş olur.

Karışım sürecinde akışkan sıvı mevcut sıcaklığının bir miktarını daha ana akışkana aktarır ve kendi sıcaklığı azalır. Bu süreçte türbin çıkışındaki buharın belli miktarı daha yoğunlaşır. Reküperatörden ayrılan akışkan sıvı drenaj tankına pompalama yöntemiyle aktarılır. Kalan buhar da oradan kondensere yönlendirilir. Bu anda buharın amonyak oranı yüksek iken sıvının amonyak oranı düşüktür buna rağmen sıcaklıkları eşittir. Drenaj tankını terk eden sıvı yoğunlaştırıcı alanına gelerek buharın üstüne bindirilir. Bu bindirme işlemiyle buhar tamamen yoğunlaşır. Doymuş sıvı şartlarındaki kalına çevrim sıvısı yeniden elde edilir ve kalına çevrimi noktalanır (Dağdaş 2004b, Tamyerli 2007).

2.6.7 Çift Kademeli Buharlaştırma (Double Flash)

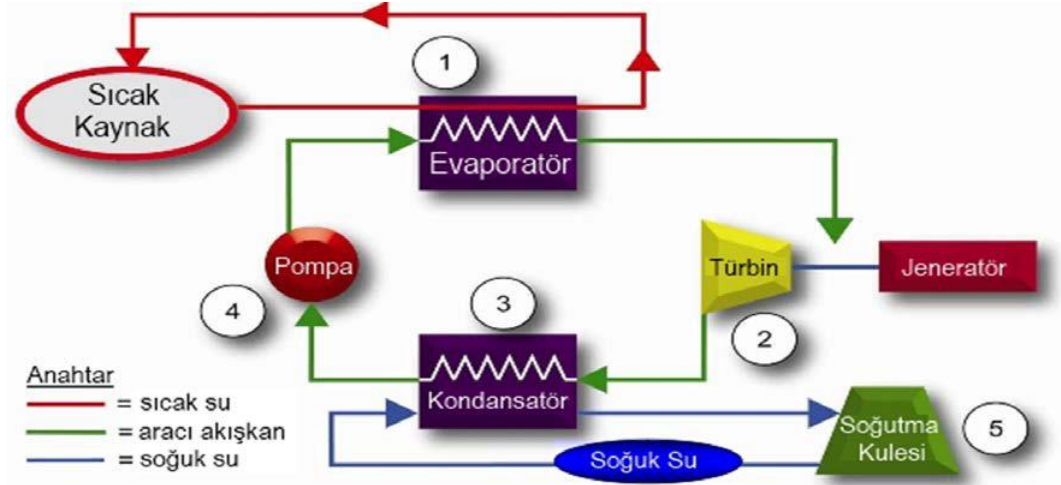
Kuyudan çıkan sıvı doğrudan seperatöre aktarılır, burada buhar ve sıvı fazları birbirinden ayrılır. Elde edilen buhar yüksek basınç türbinine, sıcak sıvı ise buharlaştırıcıya gönderilir. Buharlaştırıcı çıkışında düşük basınçla basınçlandırılan sıvının kalan bölümü reenjeksiyon kuyusuna aktarılır. Reenjeksiyona aktarılmayan buhar ise düşük basınç türbinine gönderilir. Bunun sonucunda sistem verimi artmış olur (Şahin 2016). Şekil 2.34'de Çift buharlaştırmalı (Double Flash) çevrim sistemi görülmektedir.



Şekil 2.34 Çift buharlaştırmalı (Double Flash) sistemi (Şahin 2016).

2.6.8 Organik Rankin Çevrimi (ORC)

ORC Çevrimi son yıllarda ülkemizde kurulan jeotermal santrallerde tercih ediliyor olmasına karşın dünya genelinde birçok jeotermal santralde uzun senelerdir kullanılmaktadır. ORC çalışma prensibinde Rankin çevriminde iş yapan akışkan su iken, ORC sistemde daha düşük ısıda buhara dönüşen ve yüksek basınç değerlerine ulaşabilen çeşitli organik akışkanlar tercih edilir (Özden ve Paul 2011, Şahin 2016). Şekil 2.35’de görüldüğü üzere; evaporatör içerisinde bulunan akışkan sıvının buharlaştırılması amacıyla yer altından elde edilen sıcak su ve onun ısısı kullanılır.



Şekil 2.35 ORC sistem şeması (Şahin 2016).

Seçilen çalışma sıvısı olarak silikon bazlı çeşitli sıvılar, soğutucu amaçlı sıvılar ve düşük sıcaklık değerleri içinse hidrokarbonlar kullanılır. basınçlı buhar türbine aktarılır ve alternatör yardımıyla jeneratörde elektrik enerjisi elde edilir. Jeneratör çıkışındaki buhar kondensere aktarılır ve burada yoğuşturularak yeniden sıvı faza geçirilir. Bu kısımda su soğutma kuleleri veya hava soğutmalı sistemler sistem soğutması için tercih edilebilir. Pompa aracılığıyla kondenser çıkışındaki sıvı evaporatöre aktarılır ve kapalı çevrim süreci tekrarlanır.

3. MATERYAL ve METOD

Bu çalışmada öncelikli olarak genel bir araştırma ve literatür taraması yapılarak tez çalışmasının konusu ve genel kapsamı belirlenmiştir. Konunun tespitinin ardından daha detaylı bir literatür taraması yapılarak ve konuyla ilgili olarak yerli ve yabancı çeşitli tezler, sempozyum bildirimleri, kitaplar, bilimsel makaleler, raporlar, bazı dokümanlar ve web ortamından çeşitli bilgi ile belgeler temin edilmiş ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bunun yanı sıra Aydın, Denizli ve Manisa'daki çeşitli jeotermal santrallerle iletişime geçilerek tez konusu ile alakalı bilgi ve veri talebinde bulunulmuştur. Aydın ili merkezinde ve Manisa ili Alaşehir ilçesinde kurulu olan, özel kurumlar tarafından işletilen iki adet jeotermal santral, bazı verilerinin ve isimlerinin saklı tutulması kaydıyla bu tez çalışması için bilgi ve veri paylaşımında bulunmuştur.

Araştırma konusu ile ilgili çeşitli eserler incelenmiş ve bu incelemenin sonunda tez çalışmasına faydası olabilecek bilgiler seçilip derlenerek genelden özele olacak şekilde tez belirli bölümlere ayrılmış ve buna göre düzenlenmiş ayrıca şekiller ve çizelgeler de bu düzene göre teze ilave edilmiştir. Jeotermal santrallerden ve web ortamından alınan çeşitli bilgiler sayısal verilerden de yararlanılarak yorumlanmış ve veri paylaşımında bulunan bu santrallerdeki performansı etkileyen parametreleri karşılaştırılmıştır.

Santrallerden alınan jeotermal kuyu sıcaklığı, basınç, debi ve re-enjeksiyon sıcaklığı değerleri; "Geothermal Investment Tool" mobil uygulaması kullanılarak santral net elektrik üretimi hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında oluşturulan grafikler kullanılarak bu jeotermal santrallerin enerji performansları değerlendirilerek, sistem parametrelerinin kurulu güce etkisi incelenmiştir.

Ayrıca jeotermal santral üretim maliyet süreci incelenmiş, Levelized Costs metoduyla tek flaşlı jeotermal güç santralleri için enerji maliyeti hesaplaması yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Jeotermal Santral Üretim Maliyeti

Jeotermal enerji potansiyelinden en üst düzeyde faydalanabilmek için iki faktörden oluşan maliyet ekonomisine bakmak gereklidir. Bu faktörler;

- Yer üstü maliyetleri
- Yer altı maliyetleri

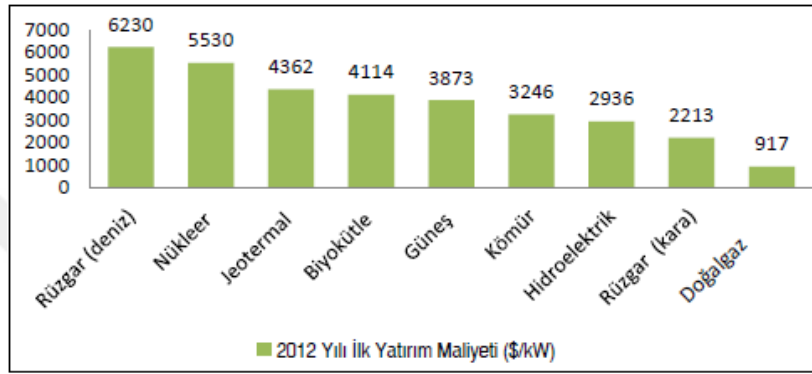
Yer üstü maliyetleri, buhar toplama sistemleri, santral inşaat süreci ve bunu kapsayan iş-işlemleri, yüzey araştırması gibi sistemleri kapsar. Yer altı maliyetleri ise kuyu açma işlemine ait yatırımları kapsar. Kuyu açma maliyetlerinde süreç belirsizlikleri oldukça fazla iken yüzey maliyetlerinde yüzeyde gerçekleşen inşa çalışmaları belirlenebilir.

Yer üstü maliyetlerinde; santralin birim enerji üretim maliyeti, santralin çalıştığı süreçteki bütün harcamalarını (ki buna ilk yatırım maliyetleriyle, bakım ve işletme maliyetleri ilave edilir) kapsayan, santralden birim elektrik enerjisi elde edilmesi için gerekli maliyeti de içeren ekonomik değerlendirme ölçөгüdür. Elektrik santrallerinin genelinde elektrik enerjisi üretimini doğrudan etkileyen asıl faktörler; ilk yatırım maliyeti ve bakım-işleme maliyetidir (Kaya ve Koç 2015). Çizelge 4.1'de elektrik enerjisi üreten santrallerin sabit ve değişken işletme maliyetleri verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında; jeotermal enerji santrallerinin sabit işletme maliyetlerinin olduğu gözlemlenmektedir.

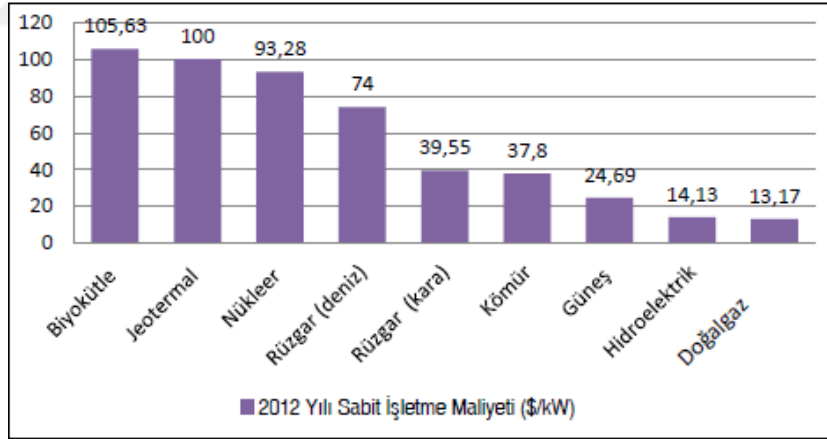
Çizelge 4.1 Enerji santrali maliyetleri (Kaya ve Koç 2015).

Santral Tipi	İlk Yatırım Maliyeti (\$/kW)	Sabit İşletme Maliyeti (\$/kW-yıl)	Değişken İşletme Maliyeti (\$/MWh)
Rüzgâr Santrali (DenizÜstü)	6230	74	-
Nükleer Santral	5530	93,28	2,14
Jeotermal Enerji Santrali	4362	100	-
Biyokütle Enerji Santrali	4114	105,63	5,26
Güneş Enerji Santrali	3873	24,69	-
Kömür Yakıtlı Linyit Santral	3246	37,8	4,47
Hidroelektrik Santrali	2936	14,13	-
Rüzgâr Santrali (Kara)	2213	39,55	-

İlk yatırım maliyeti yüksek santraller arasında jeotermal santraller de bulunmaktadır. Jeotermal enerji santralleri tabloya göre sabit işletme maliyeti yüksek santraller arasında (100\$/kW-yıl) değeriyle ikinci sırada yer almaktadır. Rüzgâr santralleri ve hidroelektrik santrallerinde olduğu gibi jeotermal enerji santrallerinin herhangi bir yakıt gideri bulunmadığından değişken işletme maliyet değeri sıfırdır (Kaya ve Koç 2015). Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de 2015 yılına ait; santrallerin ilk yatırım ve sabit işletme maliyetleri grafiklerle gösterilmiştir.

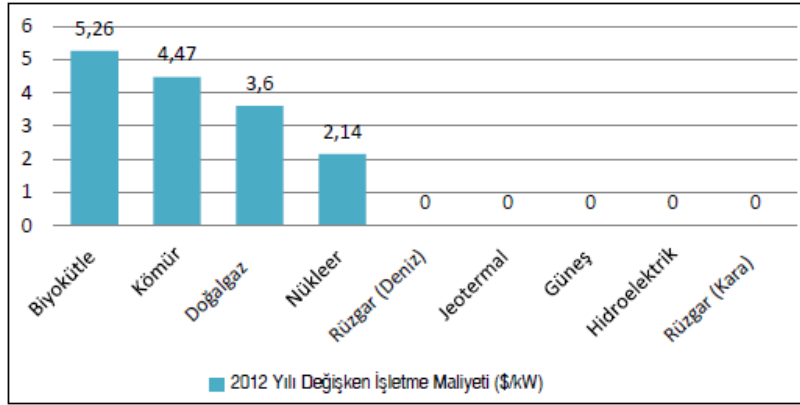


Şekil 4.1 Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri (Kaya ve Koç 2015).

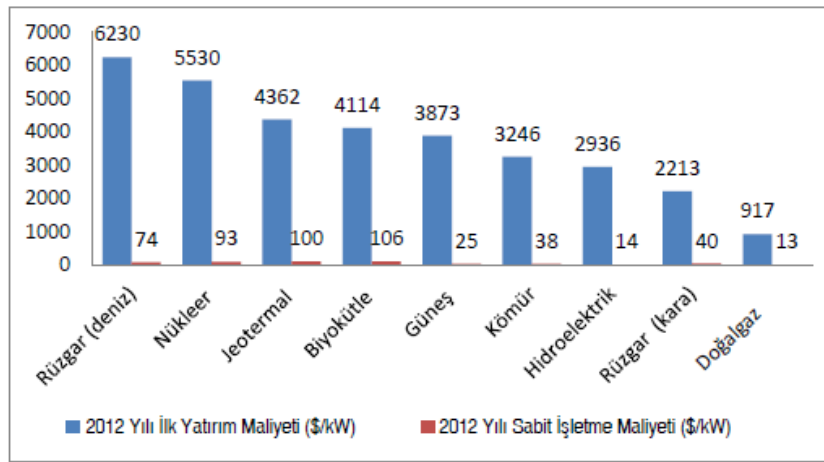


Şekil 4.2 Belirlenen santrallerin sabit işletme maliyetleri (Kaya ve Koç 2015).

Ayrıca Şekil 4.3’te 2012 yılına ait değişken işletme maliyetleri verilirken, Şekil 4.4’de ise Şekil 4.1’e göre düzenlenmiş ilk yatırım ve işletme maliyetleri grafiklerle belirtilmiştir.



Şekil 4.3 Belirlenen santrallerin değişken işletme maliyetleri (Kaya ve Koç 2015).



Şekil 4.4 Santral tipine göre ilk yatırım ve işletme maliyetleri (Kaya ve Koç 2015).

Yer altı maliyetleri kapsamında; İzlanda'da bulunan 5 adet güç santrali için gerçekleştirilen analizlerde yüzey maliyetinin ortalama olarak 1000USD/kW civarında olduğu belirlenmiştir (Stefansson 2002, Dağdaş 2005).

Kuyu açma çalışmaları ve bu çalışma ile ilgili analiz ve maliyetler; ülkeden ülkeye hatta jeotermal sahadan sahaya çok büyük farklılıklar göstermektedir. Çizelge 4.2'de ABD için tipik kuyu açma maliyetleri her bir değer bin US\$ ile çarpılarak ifade edilerek gösterilmektedir (Dağdaş 2005).

Çizelge 4.2 Jeotermal santral kuyu açma maliyeti çizelgesi (Kipsang 2015).

Kaynak Adı	Derinlikler		
	60-300 m	300-1200 m	1200-3000 m
Jeotermal Kaynak Maliyeti	225 \$	225+190= 415 \$	225+190+170=585 \$
Total maliyet	13.162,5\$	52.237,5\$	173.782,5\$

* Her derinlik değişiminde bir önceki tutar üzerine eklemeye yapılmaktadır.

Kuyu maliyeti açısından farklı bir referanstan derlenen maliyetlere bakılacak olursa (Prairie and Glowka 2000, Dağdaş 2005);

610 m'lik kuyu için birim maliyet 886 \$/m
1829 m'lik kuyu için birim maliyet 984 \$/m
3048 m'lik kuyu için birim maliyet 1083 \$/m
4572 m'lik kuyu için birim maliyet 1206\$/m

Doğrudan kullanım amacıyla açılmış jeotermal kuyuların büyük orandaki derinlikleri 550m den daha fazladır. Bu şekilde açılmış kuyuların maliyeti yaklaşık metre başına 100-650\$/m civarındadır. En çok karşılaşılan aralık değeri ise 170-350\$/m arasındadır (Battocletti 2003, Dağdaş 2005).

Entalpisi düşük olan kaynaklarda jeotermal akışkan sıvının ekserji içeriği mümkün olduğunca düşük seviyededir. Buradaki jeotermal santrallerde yüksek debilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle de bu sistemlerde önemli pompa gücüne ihtiyaç vardır. Bu durumda jeotermal santralin net güç üretiminde düşüş yaşanmaktadır (Gawlik and Kutscher 2000, Dağdaş 2005). Düşük sıcaklıklı kuyulardaki birim elektrik maliyeti, yüksek entalpili kuyulara nazaran pompalama gücünden daha fazla etkilenmektedir.

Jeotermal akışkanın sahadan toplanması ve sıvının yer altına reenjeksiyon işlemleri için yapılan yatırımları toplam maliyet üzerindeki oranı %30-40 aralığındadır (Dağdaş 2005). Küçük ölçekli binary çevrim siseli jeotermal santraller açısından sermaye, bakım ve işletme maliyetleri Çizelge 4.3'de görülmektedir (Battocletti 2003, Dağdaş 2005).

Çizelge 4.3 Küçük binary jeotermal güç santrallerinde sermaye ve O&M maliyetleri.

Net Güç (kWe)	Kaynak Sıcaklığı (°C)			Toplam O & M Maliyeti (\$/yıl)
	100	120	140	
100	2786	2429	2215	21010
200	2572	2242	2044	27115
500	2357	2055	1874	33446
1000	2143	1868	1704	48400

Çeşitli jeotermal santrallere ait birim tesis maliyetleri verilmiştir. Eldeki bu verilere; kuyu açma maliyetleriyle akışkan sıvının toplama ve reenjeksiyon maliyetleri dahil edilmemiştir. Bu hesaplarda; jeotermal iletim hattının kısıtlılığı kabul edilirken, santrale ait vergilerin dahil edilmemiştir (Dağdaş 2005).

Tipik atmosferik çıkışlı jeotermal santraller için verilen birim kuruluş maliyetleri;

- 2.5 MW için 1250 \$/kWnet
- 5 MW için 1050 \$/kWnet

Tek flaşlı jeotermal santraller için verilen birim kuruluş maliyetleri;

- 5 MW (Yoğuşmalı) için 1690 \$/kWnet
- 10 MW (Yoğuşmalı) için 1485 \$/kWnet

Binary jeotermal santraller için birim kuruluş maliyeti 1900 \$/kWnet iken Çift fazlı JGS'ler için birim kuruluş maliyetleri;

- Doğrudan atmosferik çıkışlı çift fazlı santral için 1750 \$/kWnet
- Üst Çevrim olarak atmosferik çıkışlı türbine sahip çift fazlı santral için 1620 \$/kWnet
- Alt Çevrim olarak kondensasyonlu türbine sahip çift fazlı santral için 1490 \$/kWnet

Bazı santraller için birim işletme ve bakım (O&M) maliyetleri aşağıdaki gibidir (Prairie and Glowka 2000, Dağdaş 2005);

- Flaş sistem santraller için 0,0123 \$/kWh
- Binary sistem santraller için 0,0112 \$/kWh

4.1.1 Bir Değere Getirilmiş Maliyetler Yöntemi (Levelized Costs) İle Enerji Maliyetinin Belirlenmesi

Bir jeotermal santralde üretilen elektrik enerjisinin maliyet formülü; seçilmiş bir tarih için hesaplanan yıllık sermaye masraflarına, bakım, işletme ve yakıt masraflarının eklenmesi ve bu toplamın yıllık elektrik üretim miktarına bölünmesi ile elde edilir.

$$g = \frac{Ck + Cm + Cf}{E} \quad (4.1)$$

Burada; C_f yakıt masraflarını, C_k yıllık sermaye masraflarını, E yıllık toplam elektrik üretim miktarını, C_m ise işletme ve bakım masraflarını temsil etmektedir. Jeotermal enerji santralleri için enerji maliyeti ise;

$$g = \frac{Ck + Cm}{E} \quad (4.2)$$

Olarak formülüyle ifade edilir.

Jeotermal sistemler; ekonomik yatırımların yanı sıra eskalasyon ve faiz oranlarından doğrudan etkilenmektedirler. Bu sebeple de; bir jeotermal santralinde üretilen elektrik maliyetinin daha doğru hesabı; santralin inşası ve santralin çalışma ömrü boyunca yapılan tüm masrafların referans seçilmiş bir tarih için toplamının, o santralin çalıştığı süreç boyunca üreteceği elektrik enerjisine bölünmesiyle elde edilir. Bu yöntemde LC (levelized costs yöntemi) yani bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi denir. “Levelized Costs” yöntemiyle elde edilen enerji maliyet değeri; toplam enerji miktarı ile çarpıldığında elde edilen değer, santral için yapılan tüm masrafların aynı tarihe getirilmiş değerine eşittir. Bu yöntem sürecinde enerji üretim maliyeti aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Dağdaş 2005).

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [Ck(t) + Cm(t) + Cf(t)]. (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t). (1 + r)^{-t}} \quad (4.3)$$

bu bağıntıda, C_k sermaye masrafını, C_f yakıt masrafını, C_m işletme ve bakım masrafını, r iskonto oranını, E yıllık üretilen enerji miktarını, t yılı temsil eder. Jeotermal santrallerde yakıt giderleri olmadığı için bu denklem aşağıdaki hale gelir.

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [Ck(t) + Cm(t)]. (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t). (1 + r)^{-t}} \quad (4.4)$$

4.1.2 Tek Flaşlı Jeotermal Güç Santralleri İçin Enerji Maliyetinin Belirlenmesi

Flash tipi çevrim sistemi kullanan jeotermal santraller açısından kuyu açma maliyetleri, saha geliştirme ve birim tesis maliyeti dâhil edilmeksizin 1485 \$/kWe olarak hesaplanmıştır. Bu birimler de ilave edildiğinde santral birim maliyeti 2004 fiyatları ile 1988 \$/kWe civarındadır.

2005 senesinde inşaatına başlanan ve inşa süreci 5 yıl öngörülerek 2010'da işletmeye başlatılması hesaplanan bir 20MWe güç üretim kapasiteli tek flash jeotermal santralde elde edilen elektrik enerjisinin maliyetinin belirlenebilmesi için bir program dahilinde yapılan analizler sonucu elde edilen bazı karakteristik değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir (Dağdaş 2005). Bu jeotermal santral için kapasite faktörü %90 hedeflenmiştir.

Çizelge 4.4 Analizlerde elde edilen ve süreçte kullanılan bazı değerler.

Birim Tesis Maliyeti	1988 \$/kW _e
Santral Yük Faktörü	0,90
Santral Ömrü	25 Yıl
Santralin İnşa Süresi	5 Yıl
Faiz Oranı	%6,8
Eskalasyon Oranı	%5
İskonto Oranı	%8
Birim O & M Maliyeti	70 \$/kW _e yıl

Bu santralin inşaat sürecindeki yatırımlar şu şekilde belirlenmiştir.

- 1. yıl: %20,
- 2. yıl: %30,
- 3. yıl: %30,
- 4.yıl: %15,
- 5.yıl: %5

20-30MW güç üreten bir jeotermal santral için inşa süresi literatürde 6 sene olarak hedeflenir. Ancak bu çalışmada santral yapım süreci 5 sene olarak belirlenmiştir.

4.1.2.1 Yıllık Sermaye Masrafları

Tek flaşlı sistem kullanan bir jeotermal güç santrali için birim tesis bedeli 1988 \$/kW olarak kabul edilebilir (Dağdaş 2005). İnşaat birim tesis bedeline ek olarak santral fiziki inşaat ederi (I_d) aşağıdaki gibi bir denklem aracılığıyla bulunabilir;

$$I_d = C_s \times N_e \quad (4.5)$$

burada C_s birim tesis bedelini, N_e ise santral kurulu gücünü ifade eder. Buna göre fiziki santral bedeli 2005 yılı itibari ile 39 760000\$ olarak belirlenmektedir.

Jeotermal santralin çalışmaya başlayacağı belirlenen 2010 senesinde toplam yatırım bedelinin netleşebilmesi amacıyla, inşaat sürecindeki eskalasyon ve faiz yüklerinin belirlenmesi ön şarttır. Burada bahsi geçen eskalasyon (e), inşaat süresince kullanılan ekipman, malzemeler ile işçilik fiyatlarındaki pozitif yönlü değişikliklerdir. Çünkü inşaat sürecinde gerçekleşen yatırım harcamaları 5 senede eskalasyon etkisiyle, belirlenen inşaat bedelinden daha yüksek çıkacaktır. Yıllık eskalasyon değişim oranı ve harcama yöntemi ile inşaat sürecinde seçilen bir yıla ait eskalasyon değeri ve eskale edilmiş bir yıllık harcamalar değerlendirilebilir. Çizelge 4.5’de seçilen bir yıla ait eskalasyon hesabı bulunmaktadır (Dağdaş 2005).

Çizelge 4.5 İnşaat süresince eskalasyon hesabı.

Yıl Sonu	Eskalasyon Periyodu	Harcama Dağılımı (%)	Eskalasyonsuz Harcama Planı (M\$)	Eskale Edilmiş Harcama Planı (M\$)	Eskalasyon Yükü (M\$)
2005	1	20	7.952	8.350	0.387
2006	2	30	11.92	13.15	1.223
2007	3	30	11.92	13.80	1.880
2008	4	15	5.964	7.249	1.285
2009	5	5	1.988	2.537	0.549
	TOPLAM	100	39.76	45.09	5.335

e=%5

İnşaat süreci için firma tarafından kredi alındığı da hesaplanırsa bu eskalasyon değerine bir de kredi faiz yükünün de eklenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.6’da inşaata dair faiz yükü ve inşaat sonundaki toplam yatırım maliyetleri de verilmiştir.

Çizelge 4.6 İnşaat süresince faiz hesabı.

Yıl Sonu	Faiz Peryodu	Eskale Edilmiş Harcama (M\$)	Eskale Edilmiş Harcama+Faiz(M\$)	Faiz (M\$)	Yükü
2005	4	8.350	10.86	2.513	
2006	3	13.15	16.02	2.869	
2007	2	13.80	15.75	1.942	
2008	1	7.249	7.742	0.492	
2009	0	2.537	2.537	0	
TOPLAM		45.09	52.91	7.817	

i=%6.8

İnşaat süresi boyunca gerçekleştirilen harcamalar ve eskalasyon değişikliklerine ek olarak kredi faiz yükü toplamı 52,91 M\$ gibi bir rakam hesaplanmaktadır. İşletmeye başlama süresi bakımından başlangıç değeri P olan yatırımın sabit yıllık sermaye maliyeti;

$$Ck = P \cdot \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (4.6)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Bu durumda sermaye masrafına ek olarak alınan kredinin geri ödenmesi süreci santralin çalışmaya başlama tarihi olarak belirlenen 2010 olursa, santralin çalışma sürecinde yıllık sermaye masrafı (Dağdaş 2005);

$$Ck = P \cdot \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = 52,91 \left[\frac{0,068 (1 + 0,068)^{25}}{(1 + 0,068)^{25} - 1} \right] = 4,459 M\$ \quad (4.7)$$

Olarak hesaplanır. Santralin yıllık ortalama elektrik enerjisi üretimi ise;

$$E = 8760 \times N_e \times L_f = 8760 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,90 = 157,7 \cdot 10^6 \text{ kWh/yıl} \quad (4.8)$$

olarak elde edilir burada L_f yük faktörüdür.

Geri ödeme süreci göz önüne alındığında burada (n=25) yani 25 yıl içerisinde her sene geri ödenecek sabit bir miktar vardır. Bu miktarın yıllara göre faiz yükü ve anapara olan miktarı ile yıllık ödemelerin 2010 değeri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Sabit yıllık sermaye masrafı ve “Levelized Costs” metodu ile sermaye maliyetinin hesabı (Dağdaş 2005).

Yıl	t	Borç	Yıllık Faiz Ödemesi i=%6.8	Yıllık Anapara Ödemesi	Yıllık Sermaye Masrafları (C _k)	(1+r) ^{-t} r=%6.8	Bugünkü Değer (1.1.2010)
2010	1	52.91	3.598	0.860	4.459	0.9259	4.129
2011	2	52.05	3.539	0.919	4.459	0.8573	3.823
2012	3	51.13	3.477	0.981	4.459	0.7938	3.540
2013	4	50.15	3.410	1.049	4.459	0.7350	3.277
2014	5	49.10	3.339	1.120	4.459	0.6806	3.035
2015	6	47.98	3.263	1.196	4.459	0.6302	2.810
2016	7	46.79	3.181	1.278	4.459	0.5835	2.602
2017	8	45.51	3.095	1.364	4.459	0.5403	2.409
2018	9	44.14	3.002	1.457	4.459	0.5002	2.231
2019	10	42.69	2.903	1.556	4.459	0.4632	2.065
2020	11	41.13	2.797	1.662	4.459	0.4289	1.912
2021	12	39.47	2.684	1.775	4.459	0.3971	1.771
2022	13	37.69	2.563	1.896	4.459	0.3677	1.640
2023	14	35.80	2.434	2.025	4.459	0.3405	1.518
2024	15	33.70	2.296	2.162	4.459	0.3152	1.406
2025	16	31.61	2.149	2.310	4.459	0.2919	1.302
2026	17	29.30	1.992	2.467	4.459	0.2703	1.205
2027	18	26.83	1.825	2.634	4.459	0.2502	1.116
2028	19	24.20	1.646	2.813	4.459	0.2317	1.033
2029	20	21.39	1.454	3.005	4.459	0.2145	0.956
2030	21	18.38	1.250	3.209	4.459	0.1987	0.885
2031	22	15.17	1.031	3.427	4.459	0.1839	0.820
2032	23	11.74	0.798	3.660	4.459	0.1703	0.759
2033	24	8.084	0.549	3.909	4.459	0.1577	0.703
2034	25	4.175	0.284	4.175	4.459	0.1460	0.651
TOPLAM		0	58.56	52.91	111.4	---	47.60

(M\$)

25 sene sürecinde ödenmesi gereken sabit yıllık sermaye masrafının günümüz değeri;

$$\sum_{t=1}^{25} C_k(t) \cdot (1+r)^{-t} = 4,459 \cdot 10^6 \cdot (1+0,068)^{-t} = 47,60 \text{ M\$} \quad (4.9)$$

olarak hesaplanır. Diğer taraftan;

$$\sum_{t=1}^{25} E(t) \cdot (1+r)^{-t} = 157,7 \cdot 10^6 \cdot (1+0,068)^{-t} = 16,83 \cdot 10^8 \text{ [kWh/yıl]} \quad (4.10)$$

Olarak bulunur. “levelized costs” metoduyla, birim enerji başına sermaye maliyeti (g_k);

$$g_k = \frac{47,60 \cdot 10^9}{16,83 \cdot 10^8} = 28,28 \text{ mills/kWh} \quad (4.11)$$

olarak hesaplanır ve burada 1 \$ = 1000 mills kabul edilir (Dağdaş 2005).

4.1.2.2 Yıllık İşletme ve Bakım (O&M) Masrafları

Jeotermal santrallerde bakım ve işletme maliyeti, jeotermalin yatırımın maliyetinin %3-%4 aralığındadır. Bu örnekte gerçekleştirilen analizlere bakım ve işletme maliyeti olarak 70 \$/kWe yıllık değer olarak seçilmiştir. Jeotermal yıllık bakım ve işletme masrafı;

$$C_m = 70 \times 2 \times 10^4 = 14.10^5 \text{ \$/yıl} \quad (4.12)$$

Olarak hesaplanır. Hesaplanan O&M masrafları geleceğe dair gerçek eskalasyon olmadığı var sayılır. Çizelge 4.8'de işletmenin çalıştığı süreçte O&M masraflarının günümüz değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.8 Levelized Cost Metodu ile O&M maliyetinin hesaplanması (Dağdaş 2005).

Yıl	t	Yıllık O & M Masrafları (C _m)	Bugünkü Değeri	$(1+r)^{-t}$ r=%6.8
2010	1	1.400	1.296	0.9259
2011	2	1.400	1.200	0.8573
2012	3	1.400	1.111	0.7938
2013	4	1.400	1.029	0.7350
2014	5	1.400	0.952	0.6806
2015	6	1.400	0.882	0.6302
2016	7	1.400	0.816	0.5835
2017	8	1.400	0.756	0.5403
2018	9	1.400	0.700	0.5002
2019	10	1.400	0.648	0.4632
2020	11	1.400	0.600	0.4289
2021	12	1.400	0.555	0.3971
2022	13	1.400	0.514	0.3677
2023	14	1.400	0.476	0.3405
2024	15	1.400	0.441	0.3152
2025	16	1.400	0.408	0.2919
2026	17	1.400	0.378	0.2703
2027	18	1.400	0.350	0.2502
2028	19	1.400	0.324	0.2317
2029	20	1.400	0.300	0.2145
2030	21	1.400	0.278	0.1987
2031	22	1.400	0.257	0.1839
2032	23	1.400	0.238	0.1703
2033	24	1.400	0.220	0.1577
2034	25	1.400	0.204	0.1460
TOPLAM		35	14.94	----

(M\$)

25 sene boyunca yıllık O&M masraflarının bu günkü değeri yaklaşık 14,94M\$ civarındadır. Buna göre “bir değere getirilmiş maliyetler” metoduyla birim elektrik enerjisi başına işletme ve bakım (O&M) maliyeti (g_m);

$$g_m = \frac{14,94 \cdot 10^9}{16,83 \cdot 10^8} = 8,879 \text{ [mills/kWh]} \quad (4.13)$$

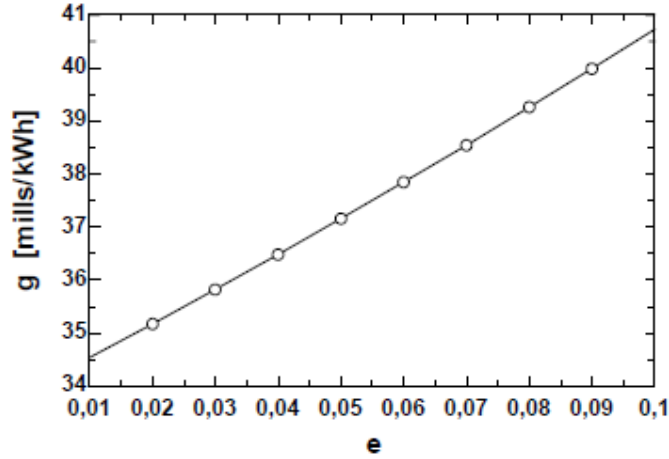
Elde edilir (Dağdaş 2005).

4.1.2.3 Toplam Enerji Maliyeti

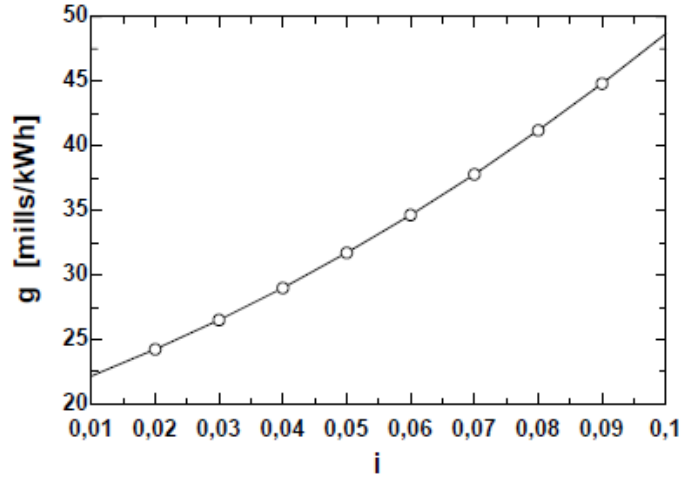
Elde edilen bu değerler sonucunda “levelized costs” metoduna göre bir jeotermal santralde elde edilen enerjinin birim maliyeti (g);

$$g = g_k + g_m = 28,28 + 8,879 = 37,16 \text{ mills/kWh} \quad (4.14)$$

Olarak hesaplanır. Eskalasyon oranı ve faiz yükünün birim enerji maliyetine etkisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.

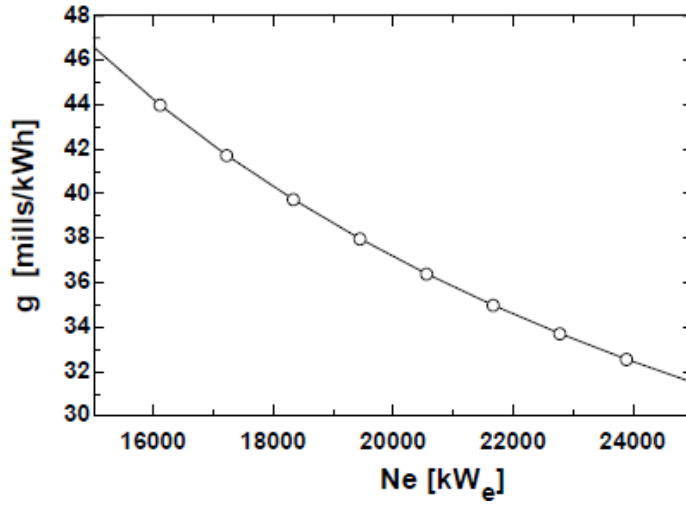


Şekil 4.5 Eskalasyon oranının birim enerji maliyeti ile değişim grafiği ($i=0.068$, $N_e=20$ MW)



Şekil 4.6 Faiz oranının birim enerji maliyeti ile değişimi ($e=0.05$, $N_e=20$ MW).

Elektrik enerjisi üreten santrallerde; santralin gücü arttırılınca ters orantılı olarak birim elektrik üretim maliyeti düşer. Bu örnekte tek flaşlı güç santrali için karakteristik durum irdelenmiştir. Şekil 4.7’de sistemin gücü ile birim elektrik maliyeti arasındaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Tek flaşlı santrallerde birim elektrik üretim maliyetinin santral gücüne bağlı değişimi ($i=0.068$, $e=0.05$)

4.2 Jeotermal Santral Sistem Parametrelerinin Performansa Etkileri

Santrallerden alınan jeotermal akışkan giriş sıcaklığı, soğutma suyu debisi, soğutma suyu giriş sıcaklığı ve jeotermal akışkan debisi değerleri; "Geothermal Investment Tool" mobil uygulaması kullanılarak santral net elektrik üretimi hesaplanmıştır ve minimum,

nominal ve maksimum değerler baz alınarak parametrelerin net elektrik üretimine etkilerinin gösterildiği grafik eğrileri elde edilmiştir. Bu grafikler kullanılarak parametrelerin performans üzerine etkileri belirlenmiştir.

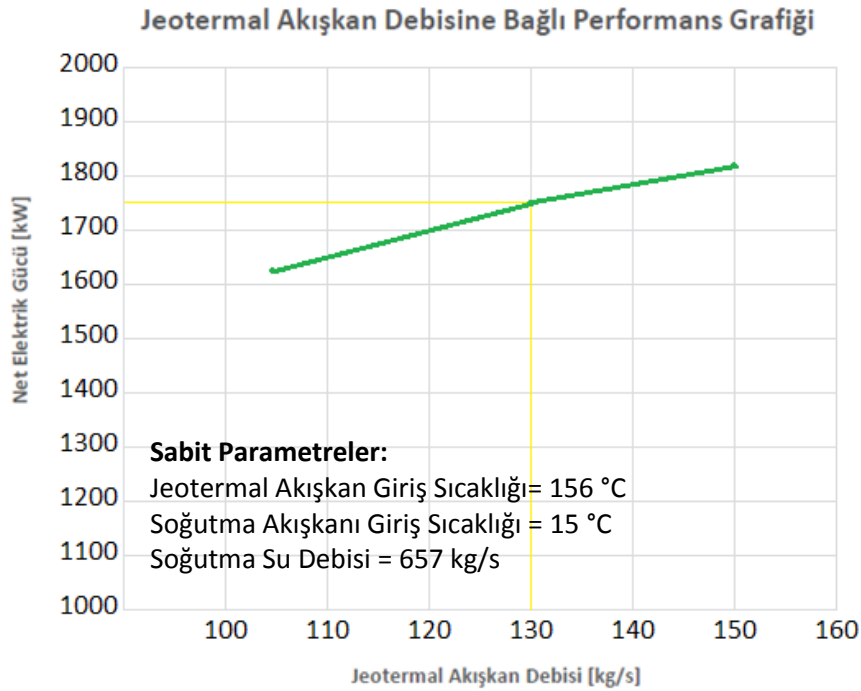
4.2.1 Jeotermal Kaynak Debi Değişimine Göre Performans Eğrisi

Bu inceleme sürecinde üç parametre sabit tutulmuştur. Bunlar; soğutma suyu debisi 657 kg/s, soğutma suyu giriş sıcaklığı 15 °C ve jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156 °C'dir. Ayrıca; nominal akış miktarının %25 altı ve %10 üzerinde ki aralık çalışma aralığı olarak alınmıştır. Çizelge 4.9'da Jeotermal akışkanın minimum ve maksimum akış miktarlarına bağlı net elektrik enerjisi üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 Jeotermal akışkan min-max akış miktarına göre net elektrik üretimi.

AÇIKLAMA	Minimum Akış	Nominal Akış	Maksimum Akış
Jeotermal Akışkan Debisi (kg/s)	105	130	150
Net Elektrik Gücü (kW)	1622	1757	1812

Şekil 4.8'de Jeotermal akışkanın minimum, nominal ve maksimum akış miktarları ele alınarak üç değişken değerinden elektrik üretim çıktısı hesaplanmıştır.



Şekil 4.8 Jeotermal akışkan debi değişimine göre net elektrik üretim grafiği.

Buna göre; grafik 105 -130kg/s değerlerinde doğrusala yakın artış gösterirken 130kg/s üzerinde ise doğrusaldan çok eksene paralele yakın artarak devam ettiği gözlemlenmiştir (Şahin 2016).

Soğutma akışkan giriş sıcaklığı 15 °C ve jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156 °C değerleri sabit tutulduğunda nominal akış değeri 130kg/s nominal değerinde iken; jeotermal santralimizin maksimum performansa ulaşip tam verimde çalıştığı görülmektedir. Nominal değer aynı zamanda sistemin kırılma noktasıdır. Soğutma suyu debisi nominal akış değeri sistemin kırılma noktasını geçtiği anda jeotermal akış debisi maksimuma yaklaşırken sistemin lineer performansının etkilendiği gözlemlenmektedir. Maksimum güç elde edilebilmesi için jeotermal akışkan debisi nominal değer aralığında iken sabit parametrelerden soğutma suyu debisinin 657 kg/s, soğutma suyu giriş sıcaklığının 15 °C ve jeotermal akışkan giriş sıcaklığının 156 °C olan optimal seviyede tutulması gerekmektedir. Minimum değerde elde edilen net elektrik gücü yeterli değildir maksimum değerde elde edilen net elektrik gücü nominal değerden daha yüksektir ancak jeotermal akışkan debisinin artması iç tüketimin artmasına neden olmaktadır bu da istenilen performansın elde edilmesinde negatif yönde etki etmektedir.

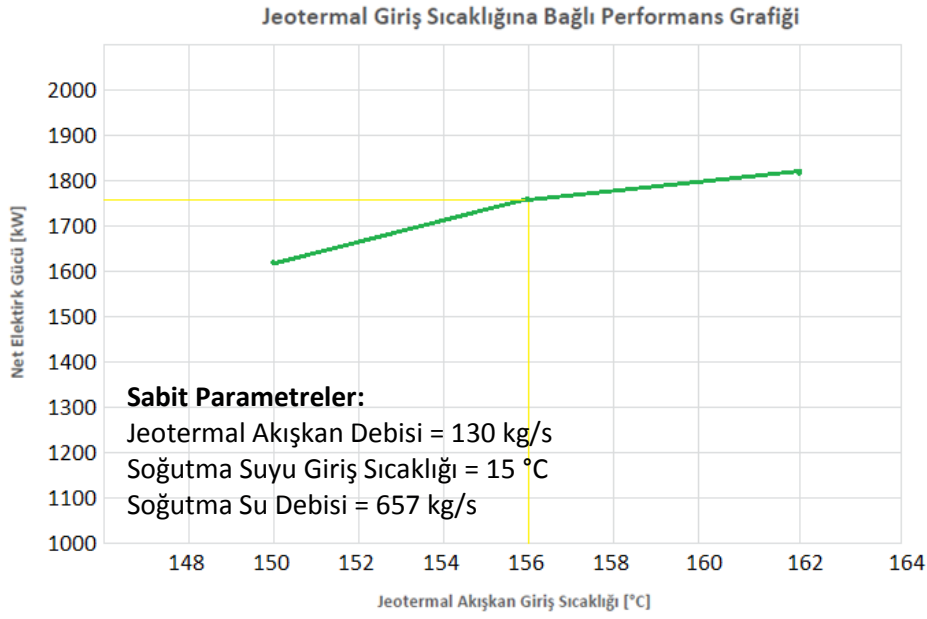
4.2.2 Jeotermal Kaynak Sıcaklık Değişimine Göre Performans Eğrisi

Bu inceleme sürecinde üç parametre sabit tutulmuştur. Bunlar; soğutma suyu debisi 657 kg/s, soğutma suyu giriş sıcaklığı 15 °C ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s'dir. Nominal Sıcaklığın yaklaşık $\pm\%4,5$ 'i çalışma aralığı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.10'da Jeotermal akışkanın minimum ve maksimum sıcaklığına bağlı net elektrik enerjisi üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10 Jeotermal akışkan min-max sıcaklığına göre net elektrik üretimi.

AÇIKLAMA	Minimum Sıcaklık	Nominal Sıcaklık	Maksimum Sıcaklık
Jeotermal Akışkan Giriş Sıcaklığı (°C)	150	156	162
Net Elektrik Gücü (kW _{el})	1622	1757	1812

Şekil 4.9'da Jeotermal akışkanın minimum, nominal ve maksimum sıcaklığı olmak üzere üç değişken değerinden elektrik üretim çıktısı hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 Jeotermal akışkan sıcaklık değişimine göre net elektrik üretim grafiği.

Buna göre; grafik 150 -156 °C değerlerinde doğrusala yakın artış gösterirken 156°C üzerinde ise doğrusaldan çok eksene paralele yakın artarak devam ettiği gözlemlenmiştir (Şahin 2016).

Soğutma suyu giriş sıcaklığı 15 °C ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s değerleri sabit tutulduğunda jeotermal akışkan giriş sıcaklığı nominal değerindeyken; ulaşılan sıcaklık ile jeotermal santralimizin maksimum performansına ulaşmış ve tam verimde çalıştığını göstermektedir. Nominal değer aynı zamanda sistemin kırılma noktasıdır. Jeotermal akışkan giriş sıcaklığı sistemin kırılma noktası 156 °C'yi geçtiğinde, sıcaklık maksimuma yaklaşırken sistemin lineer performansının etkilendiği gözlemlenmektedir. Sistemden maksimum güç elde edilebilmesi için jeotermal akışkan giriş sıcaklığı nominal değer aralığında iken sabit parametrelerden soğutma suyu debisinin 657 kg/s, soğutma suyu giriş sıcaklığının 15 °C ve jeotermal akışkan debisinin 130 kg/s olan optimal seviyede tutulması gerekmektedir. Minimum değerde elde edilen net elektrik gücü yeterli gelmemektedir ve maksimum değerde elde edilen net elektrik gücü nominal değerden daha yüksektir ancak jeotermal giriş sıcaklığının artması sistem ekipmanlarında ve kullanılan türbin çeşidinin değişimine neden olmaktadır ki reelde sistem sıcaklığının artması da mümkün değildir.

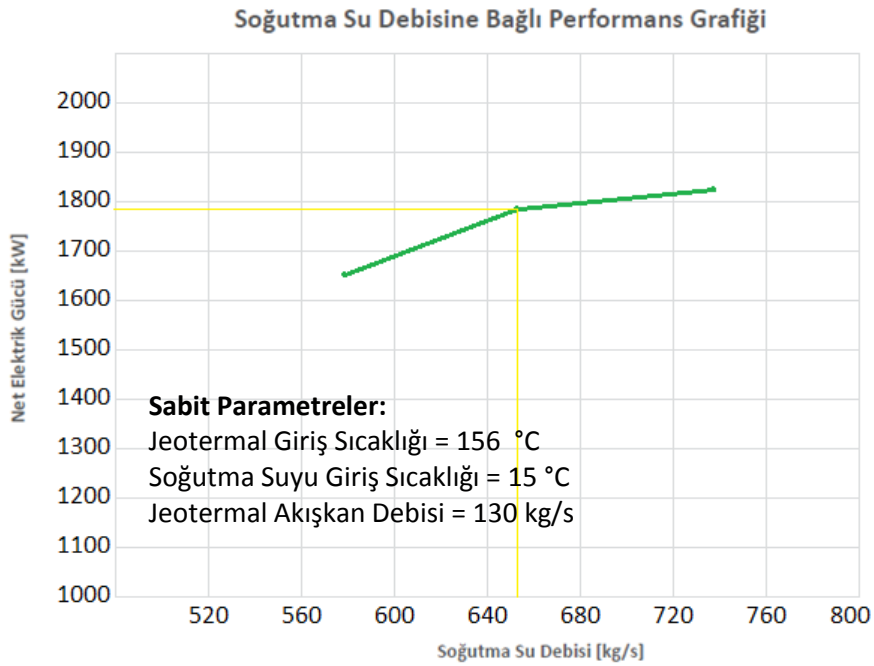
4.2.3 Soğutma Suyu Debi Değişimine Göre Performans Eğrisi

Bu inceleme sürecinde üç parametre sabit tutulmuştur. Bunlar; jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156 °C, soğutma suyu giriş sıcaklığı 15 °C ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s 'dir. Nominal Akışın yaklaşık $\pm\%10$ 'u çalışma aralığı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.11'de Soğutma suyu debisi minimum ve maksimum sıcaklığına bağlı net elektrik enerjisi üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.11 Soğutma suyu debi değişimine göre net elektrik üretimi.

AÇIKLAMA	Minimum Akış	Nominal Akış	Maksimum Akış
Soğutma Suyu Debisi (kg/s)	580	657	735
Net Elektrik Gücü (kWel)	1658	1796	1865

Şekil 4.10'da soğutma suyunun minimum, nominal ve maksimum akış miktarları olmak üzere üç değişken değerinden elektrik üretim çıktısı hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 Soğutma suyu debi değişimine göre net elektrik üretim grafiği.

Buna göre; grafik 580-657kg/s değerlerinde doğrusala yakın artış gösterirken 657kg/s üzerinde ise doğrusaldan çok eksene paralele yakın artarak devam ettiği gözlemlenmiştir (Şahin 2016).

Jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156 °C ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s değerleri sabit tutulduğunda soğutma suyu debisi nominal değerindeyken; ulaşılan değer ile jeotermal santralin maksimum performansa ulaşip tam verimde çalıştığını göstermektedir. Nominal değer aynı zamanda sistemin kırılma noktasıdır. Soğutma suyu debisi sistemin kırılma noktası 657kg/s'yi geçtiğinde, debi değeri maksimuma yaklaşırken sistemin lineer performansının etkilendiği gözlemlenmektedir. Sistemden maksimum güç elde edilebilmesi için soğutma suyu debisi nominal değer aralığında iken sabit parametrelerden jeotermal akışkan giriş sıcaklığının 156 °C, soğutma suyu giriş sıcaklığının 15 °C ve jeotermal akışkan debisinin 130 kg/s olan optimal seviyede tutulması gerekmektedir. Minimum değerde elde edilen net elektrik gücü yeterli gelmemektedir, maksimum değerde elde edilen net elektrik gücü nominal değerden daha yüksektir ancak soğutma suyu debisinin artması iç tüketimin artmasına neden olmaktadır bu da istenilen performansın elde edilmesinde negatif yönde etki etmektedir.

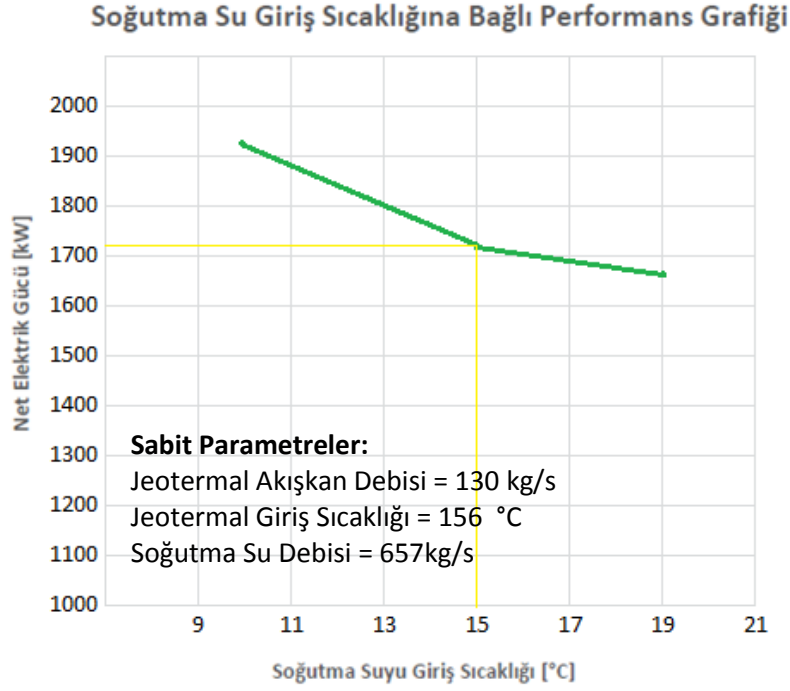
4.2.4 Soğutma Suyu Sıcaklık Değişimine Göre Performans Eğrisi

Bu inceleme sürecinde üç parametre sabit tutulmuştur. Bunlar; jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156°C, soğutma suyu debisi 657kg/s ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s'dir. Nominal Sıcaklığın yaklaşık $\pm\%36$ 'sı çalışma aralığı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.12'de Soğutma suyu sıcaklığı minimum ve maksimum sıcaklığına bağlı net elektrik enerjisi üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.12 Soğutma suyu sıcaklık değişimine göre net elektrik üretimi.

AÇIKLAMA	Minimum Sıcaklık	Nominal Sıcaklık	Maksimum Sıcaklık
Soğutma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	10	15	19
Net Elektrik Gücü (kWel)	1925	1738	1695

Şekil 4.11'de soğutma suyunun minimum, nominal ve maksimum sıcaklıkları olmak üzere üç değişken değerinden elektrik üretim çıktısı hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 Soğutma suyu giriş sıcaklık değişimine göre net elektrik üretim grafiği.

Buna göre; soğutma suyunun minimum, nominal ve maksimum sıcaklıkları olmak üzere üç değişken değerinden elektrik üretim çıktısı hesaplanmıştır. Buna göre; grafik 15°C değerlerinde doğrusala yakın artış gösterirken 15°C üzerinde ise bu sıcaklık artışının sistemin elektrik üretim potansiyelini azaltarak devam ettiği gözlemlenmiştir (Şahin 2016).

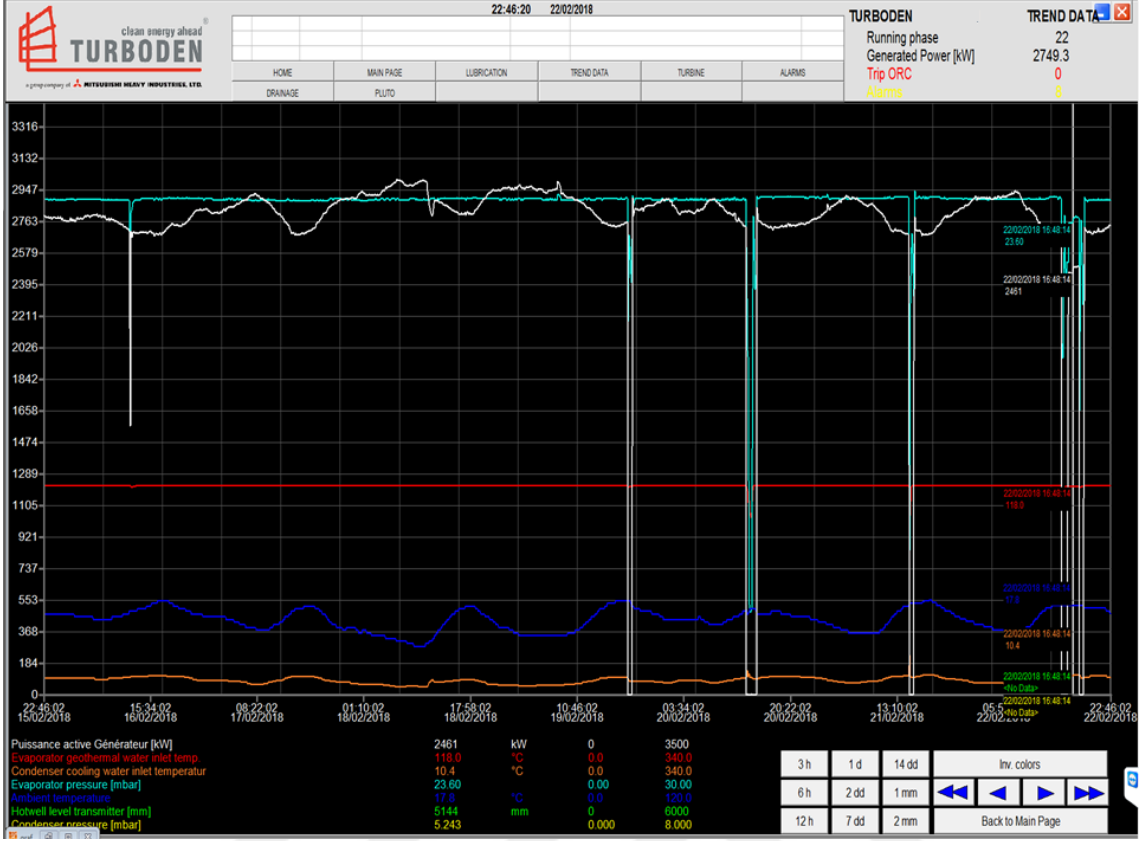
Jeotermal akışkan giriş sıcaklığı 156 °C ve jeotermal akışkan debisi 130 kg/s değerleri sabit tutulduğunda soğutma suyu giriş sıcaklığı nominal değerindeyken; ulaşılan değer ile jeotermal santralin maksimum performansa ulaşip tam verimde çalıştığını göstermektedir. Nominal değer aynı zamanda sistemin kırılma noktasıdır. Soğutma suyu giriş sıcaklığı sistemin kırılma noktası 15°C'yi geçtiğinde, sıcak değeri maksimuma yaklaşırken sistemin lineer performansının negatif yönde etkilendiği gözlemlenmektedir. Soğutma suyu giriş sıcaklığının artması sistem performansının azalmasına neden olmaktadır. Sistemin sıcaklık değerinin artması ile harcama ve giderlerin artmasına ve maliyetin de doğrusal olarak artmasına neden olmaktadır. Sistemden maksimum güç elde edilebilmesi için soğutma suyu giriş sıcaklığı nominal değer aralığında iken sabit parametrelerden jeotermal akışkan giriş sıcaklığının 156°C,

soğutma suyu debisinin 657kg/s ve jeotermal akışkan debisinin 130 kg/s olan optimal seviyede tutulması gerekmektedir. Minimum değerde elde edilen net elektrik gücü nominal değerden daha yüksektir ancak soğutma suyu sıcaklığının artması iç tüketimin çok daha fazla artmasına neden olmaktadır bu da istenilen performansın elde edilmesinde negatif yönde etki etmektedir. Maksimum değerde elde edilen net elektrik gücü yeterli değildir giderek azalmakta ve istenilen performans elde edilememektedir.

4.2.5 Soğutma Suyu Sıcaklık Değişimine Dış Ortam Sıcaklığının Etkisi

Jeotermal santrallerde soğutma suyu sıcaklığının değişimine en çok etki eden faktör dış ortam sıcaklığıdır. Özellikle yaz aylarında dış ortam sıcaklığının yükselmesi sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Genellikle hava soğutmalı sistemlerde yoğunlaşma sıcaklığının da etkilenmesiyle sistem soğutmasına ilave soğuk su eklenmektedir bu da hem sistem gider ve maliyetini artırırken hem de sistem performansında da anlık değişimlere yol açmaktadır.

Şekil 4.12’de Türkiye’deki bir jeotermal santralden temin edilen anlık enerji değişiminin görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde beyaz çizgili değişim jeneratör çıkışında elde edilen gücü gösterirken, mavi çizgili değişim dış ortam sıcaklığı göstermektedir. Şekilde de görüldüğü üzere dış ortam sıcaklığı arttığında elde edilen güç azalmakta, dış hava sıcaklığı azaldığında ise elde edilen güç artmaktadır. Özellikle yaz aylarında gün ortasında ve ısı birikiminin yoğun olduğu saatlerde dış ortam sıcaklığının artması sistemden elde edilen güç miktarının azalmasına neden olmaktadır. Jeotermal kaynaktan çıkıp evaporatöre gelen sıcak akışkanın sahip olduğu ısı dış ortam sıcaklığından etkilenmemektedir. Özel yalıtımlı borular sayesinde ısı değişimi önemsenecek miktarda gerçekleşmektedir. Kondenserde bulunan soğuk su sıcaklığı dış ortam sıcaklığıyla doğru orantılı ancak elde edilen güç ile ters orantılı şekilde hareket etmektedir. Dış ortam sıcaklığının artmasıyla burada bulunan su sıcaklığı artmaktadır ve dolayısıyla soğutma alanına ek bir maliyet teşkil etmektedir.



Şekil 4.12 Türkiye’deki bir jeotermal santralden alınmış anlık enerji değişim görüntüsü.

Aşağıda anlık görüntüdeki verilerin renk açıklamaları verilmiştir.

- Beyaz – Jeneratör Aktif Gücü
- Kırmızı – Evaporatör Jeotermal Su Sıcaklığı
- Turuncu – Kondenser Soğuk Su Sıcaklığı
- Turkuaz – Evaporatör Basıncı
- Mavi – Dış Ortam Sıcaklığı
- Yeşil – Hotwell Seviye Verici
- Sarı – Kondenser Basıncı

4.3 Jeotermal Santrallerden Temin Edilen Veriler

Manisa’nın elektrik santrali toplam potansiyeli 2398 MW’tır. 40 tane santral bulunan Manisa’da yıllık ortalama 9623 GW elektrik enerjisi üretilmektedir. Jeotermal santraller arasında Türkiye’de 6. Manisa’da 1. sırada bulunan ve 2015 yılında tam gücüyle devreye giren Alaşehir Jeotermal Santrali, 45MW kurulu gücüyle yaklaşık 57 bin

kişinin elektrik enerjisi ihtiyacına cevap verebilmektedir. Resim 4.1’de görülen jeotermal santral, Manisa Alaşehir’de özel bir firma tarafından işletilmektedir. Santral Double Flash+Binary Kombine Çevrim sistemiyle çalışmaktadır.



Resim 4.1 Alaşehir Jeotermal Santrali (İnt.Kyn.5).

Saatlik üretim değerleri bazında; YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) 2018 verilerine göre işletmedeki ünite sayısı 1 ve lisansa derç edilen yıllık üretim miktarı 300.000.000 kWh ve 2017 yılında gerçekleşen üretim 237.961.023 kWh'tir (İnt.Kyn.6). Bunun yanı sıra işletme YEKDEM'den 2025'e kadar faydalanabilecektir.

Yük talebi açısından ele alındığında Alaşehir Jeotermal santralinin kapasite faktörü %96 düzeyindedir. Planlı bakım çalışmaları haricinde lisansa derç edilen üretim kapasitesinin tamamını YEKDEM mekanizmasına dayanarak ürettiği 1 kilovatsaat elektriği 0,1120 \$ fiyat ile devlete satmaktadır.

Saatlik enerji tüketim değerleri açısından; jeotermal elektrik üretim santrallerinde seçilen çevrim tipine bağlı olarak (Double Flash+Binary Kombine Çevrim) iç tüketim değerleri oldukça değişkenlik göstermektedir. Alaşehir santrali için, santral iç tüketimi

toplam üretimin %11 ila %13 seviyeleri arasındadır. Santral maksimum güç kapasitesi ise lisansa derç edildiği üzere 45 MWe'dir.

YEKDEM raporlarından alınan veriler ve şirketlerle yapılan görüşmeler sonucu elde edilen bilgiler ışığında Manisa Alaşehir'deki ve Aydın Merkez'deki jeotermal santrallerin özellikleri Çizelge 4.13'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13 Alaşehir-Aydın jeotermal santralleri karşılaştırması.

KRİTERLER	ALAŞEHİR SANTRALİ	AYDIN SANTRALİ
Şehir Yıllık Ortalama Elektrik Enerjisi Üretimi (GW)	9623	5682
Santral Devreye Giriş Tarihi	Eylül 2015	Ekim 2018
Tam Kurulu Güç (MWe)	45 MWe	17 MWe
Üretilen Günlük İhtiyaç (Kişi)	57.368 kişi	60.423 kişi
Enerji İhtiyacı Karşılama (Konut)	60.282	63.492
Kullanılan Çevrim Sistemi	Double Flash+Binary Kombine Sistem	(ORC) Sistem
Ünite Sayısı	1	1
YEKDEM Yararlanma Son Tarihi	2025	2028
Önceki Yıl Gerçekleştirilen Elektrik Enerjisi Üretimi (KWh)	237.961.023	-

Aydın elektrik santralının toplam potansiyeli 1222 MW'tır. 59 tane santral bulunan Aydın'da yıllık ortalama 5682 GW elektrik enerjisi üretilmektedir. Jeotermal santraller arasında Türkiye'de 30. Aydın'da 20. sırada bulunan ve 2018 yılında tam gücüyle devreye giren Aydın Jeotermal Santrali, 17MW kurulu gücüyle yaklaşık 61 bin kişinin elektrik enerjisi ihtiyacına cevap verebilmektedir.

Resim 4.2'de görülen jeotermal santral, Aydın Merkez'de özel bir firma tarafından işletilmekte ve (ORC) Çevrim sistemiyle çalışmaktadır.

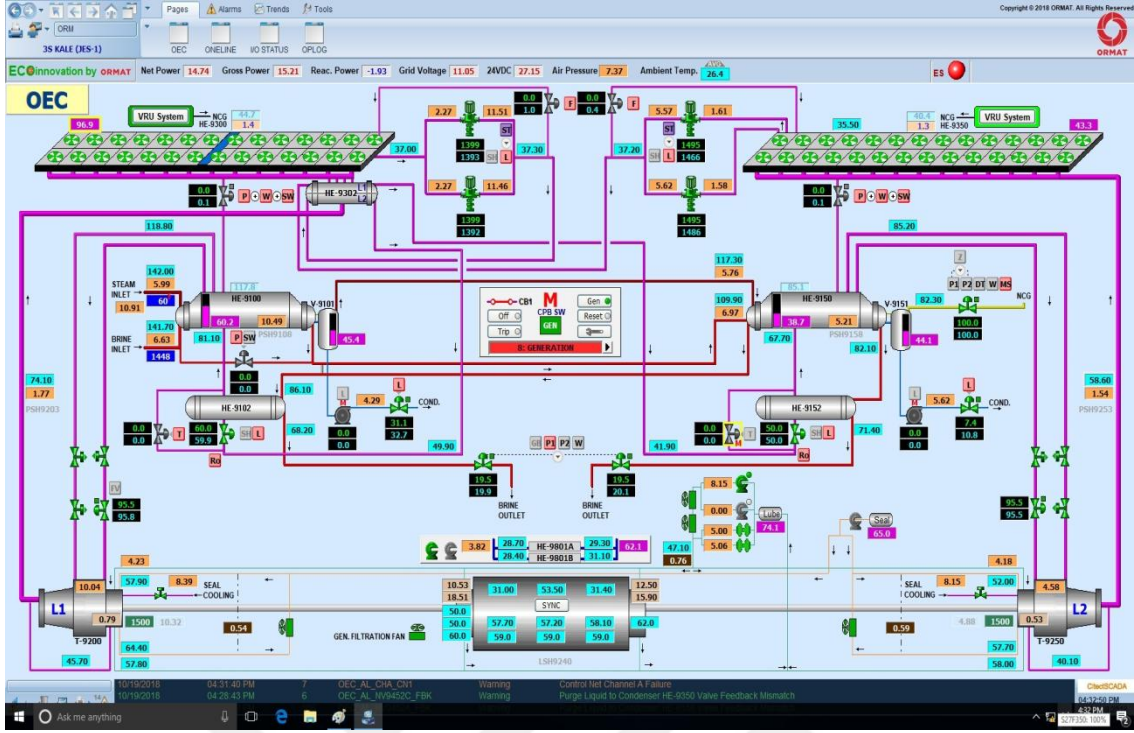


Resim 4.2 Aydın Jeotermal Santrali.

Saatlik üretim değerleri bazında; YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) 2019 verilerine göre işletmedeki ünite sayısı 1 ve lisansa derç edilen yıllık üretim miktarı 200.000.000 kWh'tir (İnt.Kyn.6). Bunun yanı sıra işletme YEKDEM'den 2028'e kadar faydalanabilecektir.

Yük talebi açısından ele alındığında Aydın Jeotermal santralinin kapasite faktörü %97 düzeyindedir. Planlı bakım çalışmaları haricinde lisansa derç edilen üretim kapasitesinin tamamını YEKDEM mekanizmasına dayanarak ürettiği 1 kilovatsaat elektriği 0,105 \$ fiyat ile devlete satmaktadır.

Saatlik enerji tüketim değerleri bazında; Jeotermal elektrik üretimi santrallerinde seçilen çevrim tipine bağlı olarak ORC sistem iç tüketim değerleri oldukça değişkenlik göstermektedir. Aydın santrali için santral iç tüketim toplamı üretimin %13 ila %16 seviyeleri arasındadır. Santral maksimum güç kapasitesi; lisansa derç edildiği üzere 17 MWe'dir. Şekil 4.13'de Aydındaki santralden alınmış bir anlık SCADA görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.13 Aydın Jeotermal Santrali'nden anlık SCADA görüntüsü.

Jeotermal santral türbini olarak Ormat kullanılmaktadır. SCADA görüntüleri alındığında sistem anlık net gücü 14,74 MW değerinde iken brüt gücü 15,21 MW değerindedir. Ortam sıcaklığı 26,4 °C olmasına karşın soğutma kuleleri sıcaklığı ise 37 °C'yi göstermektedir. Akışkan sıcaklığı 156 °C'dir fakat jeneratör girişinde bu değer 142 °C'ye kadar düşebilmektedir. Santralde Organik Rankin Cevrimi kullanılmaktadır ve ikincil akışkan olarak izopentan tercih edilmiştir.

Aydın merkezdeki jeotermal santralin kuyu ağzı sıcaklığı 156 °C değerinde 17MW elektrik enerjisi üremekte iken Alaşehir Santrali kuyu ağzı sıcaklığı 265 °C seviyesinde 45MW elektrik enerjisi üremektedir. Çizelge 4.14'de jeotermal sektörü açısından içinde Türkiye'nin de bulunduğu bazı önemli ülkelerin MWe cinsinden jeotermal kurulu güçleri verilmiştir.

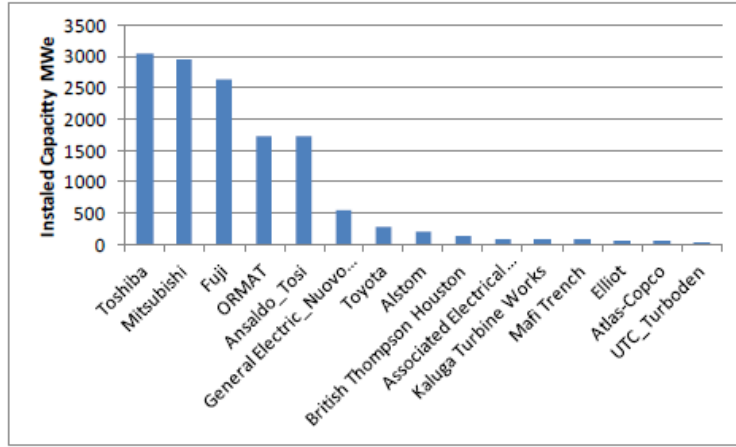
Çizelge 4.14 Jeotermal alanında önemli ülkelerin MWe olarak jeotermal kurulu güç listesi (İnt.Kyn.12).

**ÜLKELERE GÖRE DÜNYADA JEOTERMAL ENERJİ KURULU
GÜCÜ LİSTESİ**

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 Zellanda	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
TOPLAM		44374	14.471

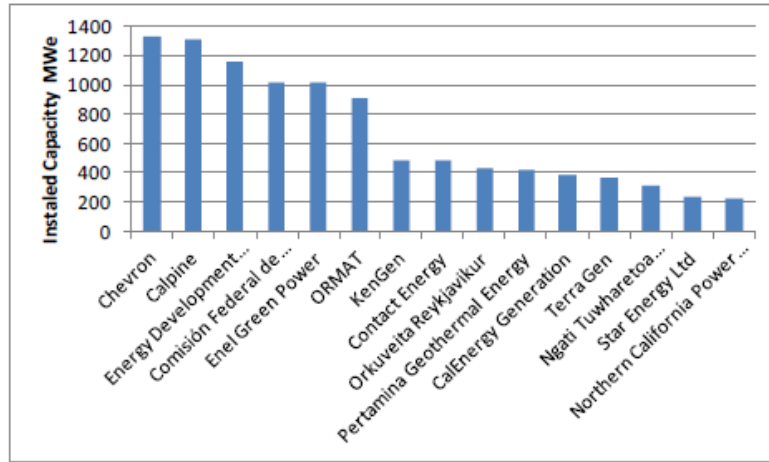
Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi elde etme konusunda ABD 3639 MWe ile en büyük güçte olan ülkedir (Dünyadaki ilk kurulan ve en büyük jeotermal santral de yine ülke sınırları içerisindedir). Dünyada jeotermal enerjiden doğrudan faydalanabilen 78 ülke arasında ülkemiz 4. sırada yer almaktadır.

Halen jeotermal santraller için türbin üretiminin lider ülkesi Japonya olmasına rağmen ülkedeki jeotermal santral yapımı durma noktasındadır. Şekil 4.14'de ise halen işletmelerde kullanılan türbin üretici firmalardan en önemlileri görülmektedir. Türkiye'de genellikle İsrail yapımı Ormat türbinleri tercih edilmektedir.



Şekil 4.14 En önemli jeotermal türbin üretici firmaları (Bertani 2015).

Bu firmaların büyük çoğunluğu teknolojide hayli ilerlemiş durumda olan Japon şirketleridir. Şekil 4.15’de dünya ülkelerinde aktif şekilde kullanılan saha operatörleri verilmiştir.



Şekil 4.15 En önemli jeotermal saha operatörleri (Bertani 2015).

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Elde edilen bulgular doğrultusunda; her iki jeotermal santralin buldukları coğrafya, kaynaktan elde edilen su sıcaklığına göre kullandıkları çevrim sistemleri çalışma verimliliklerini ve güç potansiyelini doğrudan etkilemektedir. Türkiye'deki santrallerin Ege bölgesinin ılıman ikliminde olması kış mevsimi açısından verimliliğin artmasına neden olurken, yaz mevsiminde sıcaklığın artmasıyla birlikte sistem soğutma alanlarına daha fazla yük binmesine yol açmaktadır. Jeotermal santralde soğutma kısmı hava soğutmalı ise dış ortam sıcaklığı değişimiyle soğutma kısmında harcanan enerji doğrusal oranda etkilenmektedir. Ortam sıcaklığı arttıkça soğutma sistemi için harcanan enerji artmakta doğrusal olarak iç tüketim de artmaktadır. İç tüketimin artmasıyla sistem maliyeti doğrusal yönde artmaktadır. Aynı şekilde dış ortam sıcaklığının düşmesiyle soğutma alanı için harcanan enerji azalmaktadır. Soğutma sistemi için harcanan enerjinin düşmesiyle birlikte iç tüketim de azalmaktadır. Aydın ve Alaşehir'deki jeotermal santrallerin ikisinde de soğutma sistemi olarak hava soğutmalı tercih edilmiştir bu nedenle de ortam sıcaklık değişiminden doğrudan etkilenmektedir. Özellikle yaz aylarında elde edilen güçte düşme yaşanmakta ve iç tüketim değerleri de artmaktadır. Kış aylarında ise maksimum güç elde edilmekte ve iç tüketim değerinde de azalma gerçekleşmektedir.

Aydın merkezdeki jeotermal santralin kuyu sıcaklığı 156 °C değerindedir ve bu sıcaklık değeri için seçilen Binary ORC çevrim sistemi santralden elde edilecek elektrik enerjisinin verimini oldukça artırmıştır. Kuyu ağzı sıcaklığı baz alındığında kullanılan çevrim sistemi doğru aralıktadır. ORC sistem içerisinde ikincil akışkan olarak; temin edilmesi bakımından ve buharlaşma sıcaklığı açısından izopentan tercih edilmiştir. Ayrıca Alaşehir Jeotermal Santrali kuyu ağzı sıcaklığı 265 °C iken seçilen Binary çevriminin yetersizliği Double Flash çevrim sistem ile desteklenmiş ve böylece kuyudan alınan gaz halindeki akışkan birden çok kez sistemde hareket edip santral kurulu gücünün artmasını sağlamıştır. Alaşehir Jeotermal Santrali'nde ikincil çevrim akışkanı olarak; santral kuyu ağzı sıcaklığının yüksek olması ve buharlaşma sıcaklığı açısından pentan ve izopentan tercih edilmiştir. Binary santrallerde kullanılan ikincil akışkanın termodinamik özelliğinin sistem parametreleri üzerinde etkisi büyüktür. İzopentanın kritik sıcaklığı 187,5 °C'dir ve Aydın Jeotermal Santrali'nde ORC sistem

içerisinde tercih edilmiştir. Jeotermal kuyu ağzı sıcaklık değeriyle izopentan kritik sıcaklığı aşılmamıştır. Alaşehir Jeotermal Santrali'nde ise iki adet akışkan seçilmesi iki sistemin birleşik kullanılmasından ileri gelmektedir. Türkiye'nin en yüksek sıcaklıklı akışkanına sahip Alaşehir Jeotermal Santrali bu sıcaklıktaki akışkanın enerjisinden faydalanırken ikincil akışkan seçiminde Double Flash kısmında kritik sıcaklığı 196,5 °C olan pentan kullanmaktadır. Daha sonra hala elektrik enerjisi elde edilebilecek sıcaklığa inen akışkan ikinci bir çevrim sistemine dahil edilerek burada izopentanın buharlaşmasını sağlayıp sistemin döngüsünü devam ettirmesine yardımcı olmaktadır. Akışkan sıcaklığına göre ikincil akışkan tercihi yapılmakta ve bu da sistem veriminde etkili olmaktadır.

Türkiye'deki sıcak su potansiyelinin yaklaşık %10'luk bölümü ancak elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde bu potansiyelin kullanımının daha verimli olması açısından öncelikle elektrik enerjisi üretiminde kullanılması önem arz etmektedir ve bu yönde çalışmaların artırılması gerekmektedir. Jeotermal enerjinin kullanımı açısından santrallerin bazı jeotermal kuşaklar üzerinde bulunması nedeniyle santral kurulumu kısıtlı kalmaktadır. Bu kısıtlılık ülkemizde de etkisini göstermektedir. Jeotermal santral dağılımı genellikle fay hatlarının yoğun olduğu Ege Bölgesinde yoğunlaşmıştır. Ülkemizde aktif yanardağ bulunmadığından jeotermal akışkan sıcaklığı 300 °C üzerinde olamamaktadır. Bunun yanı sıra jeolojik yapısı gereği en fazla jeotermal santral Aydın ilinde bulunmaktadır ancak buradaki akışkan sıcaklığı da 200 °C üzerinde nadir haldedir. Bütün bunlara rağmen elde edilen mevcut sıcak akışkanlardan elde edilen elektrik enerjisi düşük seviyelerdedir ve bunun artırılması yönünde devlet teşvikinin de artırılması gerekmektedir. Özellikler yerli yatırımcıların desteklenmesi konusunda daha fazla önem verilmelidir. Türkiye'de mevcut jeotermal santrallerin büyük çoğunluğu yabancı firmaların tekelinde bulunmaktadır. Yerli yatırımcıların devlet teşvikinden yararlanması milli gelirin de artmasına yol açacaktır.

Türkiye jeotermal saha açısından önemli kaynaklara sahiptir fakat bu kaynakların çoğu orta ve düşük entalpilidir. Ülkemizde en yüksek entalpili bölge Manisa bölgesi iken en büyük jeotermal saha ise Aydın ilindedir. Buralardan elde edilen sıcak suların öncelikle elektrik enerjisi üretiminde oradan konut ısıtma ve balneolojik alanda kullanılıp oradan

da çıkan suyun sera ve yol ısıtma gibi dönüşümlü bir uygulamayla değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle ısıtma bakımından jeotermal suların kullanımının doğal gaza göre tercih edilmesi hem ithalat bakımından ele alındığında daha ekonomik olmakta hem de temiz enerji ile atmosfere salınan CO₂ ve CO gazı salınımının azalmasına sebep olacaktır. Ülkemizdeki mevcut jeotermal potansiyelinin verimli kullanımı bakımından bu yöndeki araştırma ve çalışmalara hız kazandırılmalıdır.

Jeotermal potansiyelin jeotermal santrale dönüşebilmesi için öncelikle yatırım maliyeti ve birim enerji üretimi açısından maliyet analizlerine de bakılması gerekmektedir. Birim maliyet santral çalıştığı süre boyunca yapılan harcamaları ifade ederken, ilk yatırım maliyeti santralin hazır hale gelebilmesi için gerekli makine, teçhizat, arazi, temel ekipmanları ifade eder. Jeotermal santrallerin en büyük maliyetleri ilk yatırım maliyetleridir ki ülkemiz açısından bunların en önemlisi sistem ve türbin operatörleridir. Alaşehir Jeotermal Santrali ve Aydın Jeotermal Santrali'nde İsrail yapımı Ormat türbin sistemleri kullanılmaktadır. Yurt dışından getirilen bu sistemler maliyeti oldukça artırmaktadır. Bu türbin sistemlerinin kendi teknolojilerimizle yapılabilir hale getirilmesiyle dışa bağımlılık azaltılırken, sistem maliyetleri azaltılarak daha fazla jeotermal santralin ülkemize kazandırılması sağlanabilir. Yerli yatırımcıların desteklenmesi ile türbin sistemlerinin ülkemizde imalatının gerçekleştirilmesine yönelik çalışmaların hız kazanması gerekmektedir. Bu çalışmalar sürecinde de ülkemizde bu yatırımlardan destek almaya çalışan yabancı firmaların önüne geçilerek yerli yatırımcıların ön plana çıkarılması gerekmektedir. Böylece santral maliyetinin düşmesinin yanı sıra yeni bir iş istihdamı da gerçekleştirilebilir ve bölgesel kalkınmaya destek sağlanabilir.

Bir jeotermal santralden maksimum güç alınabilmesi ve optimal düzeyde tasarımın sağlanabilmesi için öncelikle jeotermal kaynağın karakteristik özelliğinin çok iyi analiz edilmesi bunun yanı sıra verilerin doğru toplanması gerekmektedir. Ülkemizdeki jeotermal kaynaklar orta entalpide, sıvı yoğunlukta ve yüksek yoğuşmayan gaz içeriklidir. Bu nedenle de çoğunlukla Flash sistem, Double Flash sistem, Binary sistem ve ORC sistemler tercih edilmektedir. Flash ve Double Flash Çevrim sistemi kullanılan santrallerde; NCGs (yoğuşmayan gaz içeriği) uzaklaştırma sistemleri kullanımı

zorunluluğu vardır. Bu da santral ilk yatırım maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Ancak binary sistemlerde bu zorunluluk bulunmamaktadır. Ayrıca kaynağın karakteristik özelliğinin yanı sıra kaynağın jeokimyası, CaCO_3 (Kalsiyum Karbonat) ve SiO_2 (Silisyum Dioksit) içeriği de oldukça önemlidir. Kaynaktan elde edilen akışkanın elektrik enerjisi üretimi sırasında sistem içinde hareketi sürecinde yüzey ekipmanlarında ve enjeksiyon kuyularında çökelmeye neden olmaktadır. Bu kimyasallardan kaynaklı meydana gelen çökeltme nedeniyle sistem ekipmanları zarar görmekte ve dolayısıyla da jeotermal santral bakım masrafları artmaktadır. Kaynağın karakteristik özelliği ve kaynağın jeokimyasına ek olarak santral yüzey ekipmanlarının verimlilikleri, türbin seçimi ve seçilen bu türbinlerin verimlilikleri, seçilen pompa ve fan sistemi verimlilikleri de santralden maksimum güç alınabilmesi ve optimal düzeyde tasarımın sağlanabilmesi için önemli etmenlerdendir.

İncelenen parametreler ve elde edilen veriler ışığında santral verimini etkileyen ve en üst düzeyde performansın alınamamasının teoride kaldığı, pratikte incelen tüm parametrelerin hepsinin tek bir kuyuda organize edilmesinin mümkün olmadığı görülmüştür. Bu sebeple de ideal bir sistem için kuyu sıcaklığı, rezervuar koşulları, entalpi, basınç ve debi değerleri dikkatle irdelenmiş ve atmosferik şartları sağlanmış bir bölgede santral kurulumu gerçekleştirilecek ise kuyu sıcaklığına bağlı olarak doğru santral tipinin kullanılması ve bu sistemde kullanılan ana ekipmanların seçiminde yerel bir tasarımla imal edilmiş malzeme ve doğru ekipman seçilmesi durumunda santralden elde edilecek performansın en üst seviyede ve bunun yanı sıra sistem maliyetinin optimal düzeyde olması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında soğutma suyu debisi, soğutma suyu giriş sıcaklığı, jeotermal akışkan giriş sıcaklığı ve jeotermal akışkan debisi baz alınarak grafik ve çizelgelerle ile sistem parametrelerinin performansa etkileri gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda çeşitli değerler sabit tutulduğunda net elektrik gücünün elde edilmesinde soğutma alanının sıcaklığının ve bu sıcaklığa etki eden parametrelerin önemi ortaya konmuştur. Bir jeotermal santralin net gücünü ve maliyetini etkileyen birden fazla parametre vardır ancak bunlardan en önemlisi soğutma suyu giriş sıcaklığı ve dolayısıyla soğutma alanı ekipmanlarıdır. Soğutma suyu giriş sıcaklığının artması sistem performansının

azalmasına, sistem iç tüketiminin artmasına ve sistem maliyetinin de doğrusal olarak artmasına neden olmaktadır. Sistemin sıcaklık değerinin artması ile harcama ve giderlerin artmasına ve maliyetin de doğrusal olarak artmasına neden olmaktadır. Özellikle hava soğutmalı sistemlerde soğutma suyu sıcaklığının değişimine en çok etki eden faktör dış ortam sıcaklığıdır. Genellikle hava soğutmalı sistemlerde yoğuşma sıcaklığının da etkilenmesiyle sistem soğutmasına ilave soğuk su eklenmektedir bu da hem sistem gider ve maliyetini artırırken hem de sistem performansında da anlık değişimlere yol açmaktadır. Ülkemizdeki jeotermal santraller buldukları alan ve iklim şartları göz önüne alındığında soğutma sisteminin bulunduğu alanlara yoğunlaşarak; soğutma alanları üzerinde daha fazla durulması sağlanmalıdır. Özellikle jeotermal santrallerin soğutma alanlarına yoğunlaşarak; sistem verimini artırmak ve aynı doğrultuda da maliyeti ve iç tüketimi azaltacak çeşitli çalışmalar yapılarak jeotermal santral verimliliğinin artırılması yönünde hem akademik hem de sektörel çalışmaların yapılması gereklidir.

Türkiye’de jeotermal enerji potansiyeli baz alındığında bu tez çalışmasının çeşitli santral yatırımlarına referans olması amaçlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Ağırkaya O. (2015). Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine evriminin Modellenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim Ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim Ve Teknoloji Programı, İstanbul.
- Aksoy N. (2019). Türkiye’de Jeotermal Kaynaklardan Elektrik Üretimi, Jeotermal Enerji Semineri Bildiriler Kitabı, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2019/İzmir.
- Arslan, F. (2016). Manisa İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli Üzerine Bir Değerlendirme, *Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, **14**: 313-337.
- Atalay Ö. (2004). Jeotermal Sistemlerin Ekserji Analizi- Kızıldere Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: Pergamon, Italy, *An overview renewable and sustainable energy reviews*, **6**: 3-65.
- Battocletti L. (2003). Financing Geothermal Energy Development: Opportunities & Challenges, National Conference on Sustainable Energy, USA.
- Bertani R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report, Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Bilgiç M. (2015). Salavatlı (Aydın) Jeotermal Alanının Hidrojeokimyasal ve Jeotermal Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Programı, İzmir.
- Dağdaş, A. (2004)(a). Jeotermal Enerjiden Yararlanmada Türkiye’nin Dünyadaki Konumu ve Potansiyeli, İstanbul, Mart-Nisan 2004, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 38-48.
- Dağdaş A. (2004)(b). Jeotermal Enerji Kaynaklarının Optimal Kullanım Modelinin Geliştirilmesi ve Yöresel Uygulaması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi,

Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Dağdaş A. (2005). Energy Cost In Geothermal Power Plants, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **2**: 84-93.
- Dickson M., Fanelli M. (2004) What is geothermal energy. Instituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy.
- Di Pippo, R. (2005). Geothermal Power Plants: Principles, Applications And Case Studies, Elsevier Advanced Technology, Oxford, England.
- Doğdu, N. (2006). Büyük Menderes Grabeni'nde Jeotermal Enerji Arama Çalışmaları. TMMOB Aydın İl Koordinasyon Kurulu Jeotermal Enerji ve Aydın'daki Geleceği Sempozyumu.
- Dursun, E. ve Binark, A. K., (2008). Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, İstanbul, 667-674.
- EPDK (2019). Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Mart 2019.
- Ergün, S., Civek, E. (2007). Kütahya'da Jeotermal Enerji ve Kullanım Olanakları, Ankara, www.kutso.org.tr/dosyalar/doc/jeotermal.doc
- Gawlik, K., Kutscher, C. (2000). Investigation of the Opportunity for Small-Scale Geothermal Power Plants in the Western United States, National Renewable Energy Laboratory Report.
- GEKA (2010). GEKA, TR 32 Düzey 2 Bölgesi (Aydın, Denizli, Muğla) 2010-2013 Bölge Planı, 2010.
- Gönen M. (2014). Kmm 302 Kimya Mühendisliği Laboratuvarı I Buharlaştırılmalı Soğutma Deneyi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isparta.
- Gören R. (2016). Alaşehir ve Çevresinde Gediz Grabeni Güney Kenar Faylarının Holosen Aktivitesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Halaçoğlu U. (2015). Kızıldere-II Jeotermal Enerji Santrali' nin Performans Analizi.

Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı, İstanbul.

Henry, A., Mlcak, P. (2001). Desing and start-up of the 2 MW Kalina Cycle Orkuveita Husavikur Geothermal Power Plant in Iceland, European Geothermal Energy Council 2th Business Seminar, Altheim, Austria, 1-8.

İncili V. (2006). Jeotermal Enerji ile Absorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Aydın İli Salavatlı Jeotermal Bölgesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Kanoğlu, M. (2002). Exergy analysis of a dual – level binary geothermal power plant, *Geothermics*, **6**: 709-724.

Kanoğlu, M. (2005). Jeotermal Elektrik Üretim Sistemleri Ve Kojenerasyon. Jeotermal Enerji Seminer Kitabı, TESKOM 2005 VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, MMO Yayın No: E/2005/393-2, 23-26 Kasım 2005, 289-299.

Kaya K., Koç E., (2015). Enerji Üretim Santralleri Maliyet Analizi, *Mühendis ve Makina*, **56**: 61-68.

Kaya, T. (2015). Jeotermal Potansiyelimiz, *Mühendis ve Makine*, **56**: 24-29.

Kaya, T. (2016) Jeotermal Enerji: Türkiye'nin Enerji Görünümü. TMMOB Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, Ankara, 659: 247-254.

Kemik, E. (2011) Tr32 Düzey 2 Bölgesi (Aydın, Denizli, Muğla) Jeotermal Kaynakları Ve Jeotermal Enerji Santralleri Araştırma Raporu. T.C. Güney Ege Kalkınma Ajansı.

Kipsang,. C,. (2015). Cost Model For Geothermal Wells, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

Kıvanç A.H. (2010). Kızıldere Jeotermal Enerji Santralinde Uygulanabilecek Farklı Çevrim Modelleri İle Santral Güçlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim Ve Teknoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Kıvanç A.H., Serpen U., (2011), Jeotermal Santrallerin Karşılaştırılması ,10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.

- Koçak E. (2010). Olasılık Sinir Ağı Kullanarak Alternatör Arızalarının Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Köse, R., Tuğcu, A., Yamık, A. (2004). Kütahya'da Jeotermal Enerji Kullanımının İrdelenmesi. II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi Bildirisi Kitabı, Kütahya, 278-283.
- Küçükca, S. (2015). Jeotermal Bölge Isıtması Dağıtım Sistemlerinin Genel Esasları. V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 506.
- Lund, W.J. Freeston, H.D. (2001). World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2000, *Geothermic*, **30**: 29-68.
- Lund, J.W. (2003). The USA Geothermal Country Update. *Geothermics*, **32**: 409-418.
- Mburu M. (2010). Geothermal Energy Utilisation. Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP, GDC and KenGen, 11p, Kenya, Oct. 29 – Nov. 19, 2010.
- Mertoğlu, O. (2017). Jeotermal Enerjinin Değerlendirilmesi, Yatırımlarının Teknolojisi ve Ekonomisi, Makine Mühendisleri Odası, TMMOB Sunumu, Ankara.
- Ocampo J. (2005). Cerro Prieto Iv, The Newest Power Plant In Cerro Prieto Geothermal Field, Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31-Feb. 2, 2005 SGP-TR-176.
- Özden H., Paul D. (2011). Organik Rankin Çevrim Teknolojisiyle Düşük Sıcaklıktaki Kaynaktan Faydalanılarak Elektrik Üretimi Örnek Çalışma: Sarayköy Jeotermal Santrali, 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- Prairie, M., Glowka, D. (2000) Diagnostic-While-Drilling: Reducing The Cost of Geothermal Produced Electricity, Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu, Japan, Mayıs 28-Haziran 10, 2393-2397
- Satman A. (2019). Türkiye'de Jeotermal-Güncel Bakış, Jeotermal Enerji Semineri Bildiriler Kitabı, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2019, İzmir.

- Serpen, Ü. (2003). Jeotermal Enerji Teknolojisinde Yeni Gelişmeler. Jeotermal Enerji Doğrudan Isıtma Sistemleri: Temelleri ve Tasarımı Seminer Kitabı, TESKOM 2003, MMO Yayın No: MMO/2003/328-4, 511-519.
- Serpen, Ü., Türkmen, N. (2007). Kızıldere Jeotermal Santralının 23 yıllık Performanslarının Değerlendirilmesi. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Semineri, 25-28 Ekim, İzmir.
- Shigeto, Y. ve Yutaka, T. ve Toshie, M., (2015). Unique Steam Turbine for Kizildere Geothermal Power Plant in Turkey, Fuji Electric Co., Proceedings World Geothermal Congress 2015, Japan.
- Stefansson, V. (2002). "Investment Cost for Geothermal Power Plant", *Geothermics*, **31**, 263- 272.
- Şahin A. (2013). Jeotermal Enerji ve Türkiye, Jeotermal Enerji Yatırımları Açısından Değerlendirme, Menderes Geothermal Elektrik Üretim AŞ Raporu.
- Şahin B., Aybers N. (1995). Enerji Maliyeti, İstanbul, *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları*, **299**: 92-122.
- Şahin C. (2016), Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Sahalarda Organik Rankin Çevrimi (Orc) İle Elektrik Enerjisi Üretiminde Afyon Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Şentürk M. (2009). Jeotermal Enerji Kaynaklarının Optimum Kullanım Modelinin Geliştirilmesi Ve Yöresel Uygulaması. Yüksek lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Şimşek, Ş., Parlaktuna, M., Akın, S., (2009). Data Gathering and Evaluation of Kızıldere. Geothermal Field prepared for Zorlu Energy, Ankara.
- Tamyerli U. (2007). Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretiminin İrdelenmesi Örnek Çalışma: Kütahya – Simav Jeotermal Sahası. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.

- TEİAŞ (2019). Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Kurulu Güç Mayıs 2019 Raporu.
- Tuğcu A. (2002). Simav Yöresindeki Mevcut Jeotermal Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretiminin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Uçmaz M.İ. (2008). Enerji Santrallerinde Maksimum Güç Eldesi İçin Senkron Ve Asenkron Generatör Kullanımının Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yıldız A. (2014). Jeotermal Enerji Kaynakları, 3. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sistemleri Kış Okulu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Yılmaz N. (2013). Aydın ve Çevresindeki Jeotermal Sulardaki Bazı Elementlerin ve İyonların İcp-Oes ve İc ile Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Aydın.
- Yönlü, Ö., (2008) Büyük Menderes Grabeninin Batı Kesiminin Morfotektonik Özellikleri ve Tarihsel Deprem Aktivitesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 107.
- Zaim, A., Çavşı, H. (2018). Türkiye'deki Jeotermal Enerji Santrallerinin Durumu, *Mühendis ve Makine*, **59**: 45-58.

İnternet Kaynakları

- 1) <http://www.jeotermalhaberler.com/jeotermal-enerjinin-tesviki-larderello-toskanadaki-yillik-jeotermal-yuruyus/>, 01.05.2019
- 2) https://www.turkcebilgi.com/ege_b%C3%B6lgesi, 06.05.2019
- 3) <http://depremturk.blogspot.com/2011/01/manisa-deprem-bolgeleri-haritas.html>, 09.05.20019
- 4) <http://www.yildizege.org/manisa-hakkinda/>, 10.05.2019
- 5) <https://intes.org.tr/uyelerimiz/zorlu-end-ve-enerji-tesisleri-insaat-tic-a-s>, 15.05.2019
- 6) <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-72/elektrikyekdem>, 13.05.2019
- 7) <http://www.erayonline.com/bobinaj-malzemeleri-bobinaj-nedir-p-6013.html>, 30.06.2019
- 8) <https://pinumerus.wordpress.com/tag/elektrigin-temel-esaslari/page/2/>, 30.06.2019
- 9) <https://optolov.ru/tr/drugie-raboty-v-vannojj/generatory-iz-asinhronnogo-dvigatelya-asinhronnyi-dvigatel.html>, 30.06.2019
- 10) <http://www.tugranmotor.com/generatorlerin-bakimi-onarimi-en.html>, 30.06.2019
- 11) <https://teknolojiprojeleri.com/mekanik/buhar-turbini-nedir-nasil-calisir>, 02.07.2019
- 12) <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-jeotermal-enerji.html>, 19.06.2019
- 13) <http://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita>, 24.07.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nazmiye Sema BALKAN KUŞCU
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya – 30.03.1982
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0554 640 0400

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Konya-Selçuklu, Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, (1996-2000)
Lisans : Selçuk Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Elektronik Öğretmenliği (2007-2010)
Yüksek Lisans : Necmettin Erbakan Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Rehberlik ve Psikolojik Danışmanlık, (Tezsiz Y.L.) (2010-2012)
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı, (2013-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Konya-Ereğli, Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi (Öğretmen) (2010-Devam ediyor)