

JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMİ
MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve ÇİNE

Danışman
Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMİ
MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Merve ÇİNE

Danışman

Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Merve ÇİNE tarafından hazırlanan “Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi Modellemesi ve Simülasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 03/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

Başkan : Doç. Dr. Engin ÇETİN
Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

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

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

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

03 / 02 / 2022

Merve ÇİNE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMİ MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Merve ÇİNE

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın günden güne artması nedeniyle elektrik üretimine dair araştırmalar devam etmektedir. Elektrik üretim yöntemleri birçok farklı başlıkta incelenebilir fakat en kapsamlı gruptandırma yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarından elektrik üretilmesidir. Yenilenebilir, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarında yer alan jeotermal enerji bakımından ülkemiz zengindir. Bu kaynakların büyük bir kısmı Ege Bölgesi'nde yer almaktadır. Ülkemiz kaynak bakımından zengin olmasına rağmen, jeotermal kaynaklardan elektrik üretim sahaları çok azdır.

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklı sahalar içerisinde yer alan Afyonkarahisar kentinin, jeotermal elektrik üretim santrali (AFJES) ele alınmıştır. Jeotermal sistem ile şebeke arasındaki eş zamanlı çalışma sürecinin gözlemini yapmak için MATLAB/Simulink 2019b programında modellemesi yapılmıştır. Simülasyonu yapılan sistemin çalışma değerlerine göre vereceği tepkiler bu çalışma sayesinde önceden belirlenebilmesi, şebekeye entegre edilmesiyle jeotermal sistem ile şebekenin eş zamanlı olarak çalışmasının gösterilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, Organik Rankine Çevrim (ORC) sisteminden bahsedilmiştir. Organik Rankine Çevrimi'nde yer alan elemanların (jeotermal kuyu, ısı değiştirici, türbin, kondenser, pompa) modellenebilmesi gerekli olan değerler için öncelikle EES programı kullanılmıştır. Bu programda, sıcaklık ve debi değişimlerine bağlı olarak her bir elemanın

giriş ve çıkışındaki entalpi (maddenin yapısında depoladığı her türden enerjilerin toplamı) değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, Jeotermal Organik Rankine Çevrim sisteminde yer alan her bir elemanın blok diyagramları tek tek modellenmiştir.

Şebekeye entegre edilmiş jeotermal elektrik üretim sisteminden gerilim, akım, güç ve frekans değerleri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

2022, xiv + 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, MATLAB, Yenilenebilir Enerji, Elektrik Üretim Sistemi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

GEOHERMAL ELECTRICITY GENERATION SYSTEM MODELING AND SIMULATION

Merve ÇİNE

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Yüksel OĞUZ

As the need for electrical energy is increasing day by day, researches on electricity production continue. Electricity production methods can be examined under many different headings, but the most comprehensive grouping is electricity generation from renewable and non-renewable energy sources. Our country is rich in geothermal energy, which is included in renewable, clean and sustainable energy sources. Most of these resources are located in the Aegean region. Although our country is rich in resources, there are very few electricity production areas from geothermal resources.

In this study, the geothermal power plant (AFJES) of Afyonkarahisar city, which is located in low temperature areas, is discussed. In order to observe the simultaneous working process between the geothermal system and the grid, it was modeled in the MATLAB/Simulink 2019b program. With this study, it is aimed to determine the reactions of the simulated system according to the operating values, and to show the simultaneous operation of the geothermal system and the network by integrating it into the network.

In addition, the Organic Rankine Cycle (ORC) system has been mentioned. The EES program was used primarily for the values required for modeling the elements (geothermal well, heat exchanger, turbine, condenser, pump) contained in the Organic Rankine Cycle. In this program, the enthalpy changes (the sum of all kinds of energies

stored by matter in its structure) at the inlet and outlet of each element are calculated depending on the temperature and flow rate changes. As a result of these calculations, the block diagrams of each element included in the Geothermal Organic Rankine Cycle system are modeled one by one.

The voltage, current, power and frequency values of the geothermal electricity generation system integrated into the grid have been analyzed and interpreted.

2022, xiv + 76 pages

Keywords: Geothermal Energy, MATLAB, Renewable Energy, Electricity Generation System

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi, bilgi birikimi sayesinde farklı açılardan bakmamı sağlayan ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yüksel OğUZ a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ' a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatımda, her konuda öneri, bilgi ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her daim benim yanımda olan, aldığım kararları destekleyen, beni her konuda cesaretlendiren, haklarını asla ödeyemeyeceğim, canım babam Rıza ÇİNE' ye annem Ayşe ÇİNE' ye ve kardeşlerime maddi manevi desteklerinden dolayı sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunar teşekkür ederim.

Merve ÇİNE
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 AFJET A.Ş Tanıtılması	2
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Yenilenebilir Enerji.....	4
2.1.1 Güneş Enerjisi	4
2.1.2 Rüzgâr Enerjisi.....	4
2.1.3 Biyokütle Enerjisi	5
2.1.4 Hidrojen Enerjisi	6
2.1.5 Dalga ve Gelgit Enerjisi	6
2.1.6 Jeotermal Enerji	7
2.1.7 Hidroelektrik Enerjisi.....	8
2.2 Jeotermal Enerji	8
2.2.1 Jeotermal Enerjinin Özellikleri	8
2.2.2 Dünya’da ve Ülkemizde Jeotermal Enerji	9
2.2.3 Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları	14
2.2.4 Jeotermal Elektrik Santral Çeşitleri	16
2.2.4.1 Kuru Buhar Tipi Jeotermal Elektrik Santrali.....	16
2.2.4.2 Flash Tipi.....	17
2.2.4.3 Binary (İkili) Akışkan Tipi.....	18
2.3 Organik Rankine Çevrimi (Organic Rankine Cycle (ORC)).....	19
2.3.1 İdeal Rankine Çevrimi	19

2.3.2 Basit ORC Sistemi	20
2.3.3 Süperkritik ORC Sistemi	21
2.3.4 Rejeneratif ORC Sistemi.....	21
2.3.5 Reküperatif ORC Sistemi.....	22
2.3.6 Buhar Türbin Tipine Göre ORC Sistemleri	22
2.3.6.1 Radyal Türbin.....	22
2.3.6.2 Aksiyal (Eksenel) Türbin	23
2.3.7 ORC Sisteminin Avantajları	24
3. MATERYAL VE METOT	26
3.1 Organik Rankine Çevrim (ORC) Matematiksel Denklemleri.....	26
3.1.1 Pompa Modellemesi için Matematiksel Denklem Takımı.....	27
3.1.2 Evaporatör (Buharlaştırıcı) için Matematiksel Denklem Takımı.....	27
3.1.3 Türbin Modellemesi İçin Matematiksel Denklem Takımı.....	28
3.1.4 Kondenser Modellemesi İçin Matematiksel Denklem Takımı	29
3.2 Afyon Jeotermal Elektrik Santrali Sistem Modellemesi.....	30
3.2.1 AFJES Özellikleri	30
3.2.2 AFJES'in EES Programında Modellemesi	32
3.2.2.1 EES (Engineering Equation Solver) Programındaki Sonuçlar.....	33
3.2.3 AFJES Sisteminin Matlab/Simulink Programında Modellenmesi.....	34
3.2.3.1 Jeotermal Kuyu Blok Diyagramı.....	34
3.2.3.2 Isı Değiştirici Blok Diyagramı	36
3.2.3.3 Türbin Blok Diyagramı	38
3.2.3.4 Kondenser Blok Diyagramı.....	40
3.2.3.5 Pompa Blok Diyagramı	41
3.2.4 Modellemesi Yapılan Santralin Şebekeye Entegre Edilmesi.....	42
3.2.4.1 Senkron Jeneratör Modellenmesi	46
3.2.4.2 Yükün Modellenmesi	48
3.2.4.3 Kesicinin Modellenmesi.....	48
3.2.4.4 PLL Modellenmesi	48
3.2.4.5 0.4 kV/34.5 kV Trafo Modellenmesi	50
3.2.4.6 Hat Modellenmesi	52
3.2.4.7 Ölçüm Bloğu Modellenmesi.....	54

3.2.4.8 Kaynak Modellenmesi.....	55
4. BULGULAR.....	57
4.1 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi ORC Sisteminde Modellemesi Yapılan Blokların Sonuçları.....	57
4.2 Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin Şebekeye Entegre Edilmesi.....	58
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	67
6. KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	74
EKLER.....	75
EK 1. Afjes'ten Verilerin Kullanımına İlişkin İzin Belgesi.....	75
EK 2. EES (Engineering Equation Solver) Programına Ait Bazı Kodlamalar.....	76

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
AC	Alternatif Akım
C	Kapasitans
CO ₂	Karbondioksit
d/dk	Devir/Dakika
DC	Doğru Akım
D ₂ O	Ağır Su
Effp	Pompa Verimliliği
Efft	Türbin Verimliliği
f	Frekans
FP	Güç Faktörü
H	İndüktans
h	Entalpi
H ₂ S	Hidrojen Sülfid Gazı
Hz	Hertz
I	Akım
Irms	Etkin Akım Değeri
J	Joule
KE	Kinetik Enerji
kg	Kilogram
kPa	Kilopascal
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt Amper
L	Bobin
l	Litre
m	Metre
m	Kütle
ṁ	Suyun Debisi
Mgeo	Jeotermal Suyun Isı Değiştiriciye Girmeden Önceki Debisi
Morc	Organik Çevrim İçindeki Suyun Debisi
MW	Megawatt
MWe	Megawatt Elektrik
η _{ıstl}	Isıl Verimlilik
Ns	Senkron Hız (Döner Manyetik Alanın Hızı)
O ₂	Oksijen
P	Kutup Sayısı
Pgo	Jeneratör Çıkış Gücü
Q	Enerji
R	Direnç
T	Sıcaklık
V	Cismin Hızı veya Cismin Konum Değiştirdiğinde Sürat
W	Güç
Y	Admitans
Z	Empedans

Kısaltmalar

AFJES	Afyon Jeotermal Elektrik Santrali
AFJET	Afyon Jeotermal Elektrik Üretim Tesisleri Tur. Sa. Tic. A.Ş
EES	Mühendislik Denklem Çözücü Programı (Engineering Equation Solver)
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
MTA	Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
ODP	Ozon Delme Potansiyeli
ORC	Organik Rankine Çevrimi (Organic Rankine Cycle)
PLL	Faz Kilitlemeli Döngü (Phase Locked Loop)
T-S Diyagramı	Sıcaklık-Entropi Diyagramı
VCO	Gerilim Kontrollü Osilatör (Voltage Controlled Oscillator)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Biyokütle Enerjisi Elde Edilme Aşamaları	5
Şekil 2.2 Jeotermal Su Oluşumu Gösterimi	7
Şekil 2.3 Türkiye Jeotermal Alanlar ve Fay hatları	10
Şekil 2.4 Yıllara Göre Kurulu Güç Değişimi Grafıksel Gösterim	11
Şekil 2.5 Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Haziran Ayı Kaynaklara Göre Üretim Tesisleri Kurulu Gücü Özet Raporu Grafıksel Gösterim	12
Şekil 2.6 Şubat Ayı 2019-2020 Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi Yüzdeler Dilim Grafıksel Gösterimi	13
Şekil 2.7 Kuru Buhar Tipi Jeotermal Elektrik Santrali	17
Şekil 2.8 Flash Tipi Jeotermal Elektrik Santrali	17
Şekil 2.9 Binary Tipi Jeotermal Elektrik Santrali	18
Şekil 2.10 İdeal Rankine Çevrimi ve T-S Diyagramı	20
Şekil 2.11 Basit ORC Sistemi ve T-S Diyagramı	20
Şekil 2.12 Süperkritik T-S Diyagramı.....	21
Şekil 2.13 Rejeneratif ORC Sistemi ve T-S Diyagramı.....	21
Şekil 2.14 Reküperatif ORC Sistemi ve T-S Diyagramı.....	22
Şekil 2.15 Radyal Dış Akış Türbin	23
Şekil 2.16 Aksiyal (Eksenel) Türbin	23
Şekil 3.1 Basit Bir ORC Yapısı Şematik Görünümü	26
Şekil 3.2 Rankine Çevrimi Sıcaklık-Entropi Grafiği	27
Şekil 3.3 Isı Değiştirici İç Yapısı	28
Şekil 3.4 AFJES Şematik Görünümü	30
Şekil 3.5 Jeotermal Kuyu Şematik Görünümü.....	35
Şekil 3.6 Jeotermal Kuyu Blok Diyagramı	35
Şekil 3.7 Isı Değiştirici Şematik Görünüm	36
Şekil 3.8 Isı Değiştirici Ünitesi Blok Diyagramı	37
Şekil 3.9 Türbinin Şematik Görünümü	38
Şekil 3.10 Isı Değiştirici Ünitesi Blok Diyagramı	38
Şekil 3.11 Kondenser Şematik Görünümü	40
Şekil 3.12 Kondenser Ünitesi Blok Diyagramı	40

Şekil 3.13 Pompa Şematik Görünümü	41
Şekil 3.14 Pompa Ünitesi Blok Diyagramı	42
Şekil 3.15 Matlab/Simulink'te Kullanılan Şebeke Blok Diyagramı	44
Şekil 3.16 Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin Matlab/Simulink Programında Modellenmesi.....	45
Şekil 3.17 Senkron Jeneratöre Ait Parametreler ve Değerleri	47
Şekil 3.18 Senkron Jeneratör Blok Alt Sisteminin Simulink'te Modellenmesi.....	47
Şekil 3.19 PLL Blok Alt Sistemi Simulink'te Modellenmesi	49
Şekil 3.20 Şebekede Kullanılan PLL Parametreleri	50
Şekil 3.21 Üç Fazlı Üçgen- Yıldız Bağlantılı Trafo.....	51
Şekil 3.22 Trafoya Ait Parametreler ve Değerleri.....	51
Şekil 3.23 π Tipi Hat Blok Diyagramının Simulink'te Modellenmesi	52
Şekil 3.24 a) Nominal Pi Devresi Eşdeğer Devre Modeli, b) Nominal Pi Devresi Fazör Diyagramı	52
Şekil 3.25 π Tipi Hatta Ait Parametreler ve Değerleri	54
Şekil 3.26 34.5 kV Gerilim Kaynağı Blok Diyagramı	55
Şekil 3.27 Matlab/Simulink Modellemesinde Yer Alan Gerilim Kaynağına Ait Parametreler ve Değerleri	56
Şekil 4.1 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemine Ait Çıkış Gerilim-Zaman Grafiği	59
Şekil 4.2 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemine Ait Akım-Zaman Grafiği	60
Şekil 4.3 Kesici Çıkışı Gerilim – Zaman Grafiği	61
Şekil 4.4 RLC Tipi Yükteki Frekans-Zaman Grafiği.....	61
Şekil 4.5 Yükteki Rampa Çıkışı Açısı- Zaman Grafiği	62
Şekil 4.6 Şebeke Çıkışındaki Gerilim-Zaman Değişim Grafiği.....	63
Şekil 4.7 Şebeke Çıkışındaki Akım -Zaman Değişim Grafiği	64
Şekil 4.8 Şebeke Çıkışındaki Frekans- Zaman Değişim Grafiği.....	65
Şekil 4.9 PLL Bloğu Çıkışındaki Rampa Çıkışı Açısı-Zaman Grafiği.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 2019 Dünya Elektrik Üretim Kapasitesi	9
Çizelge 2.2 Yıllara Göre Kurulu Güç Değişimi	10
Çizelge 2.3 Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Haziran Ayı Kaynaklara Göre Üretim Tesisleri Kurulu Gücü Özet Raporu	11
Çizelge 2.4 Şubat Ayı 2019-2020 Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi	12
Çizelge 2.5 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığa Göre Kullanım Alanları	14
Çizelge 2.6 Türkiye'nin Dönüştürülebilir Jeotermal Enerji Kategorileri	15
Çizelge 3.1 R134a Gazının Termofiziksel Özellikleri	30
Çizelge 3.2 Gazların Zehirlilik Sınıflandırılması	31
Çizelge 3.3 AFJES'E Ait Çalışma Verileri	32
Çizelge 3.4 EES Programında Sıcaklık, Debi ve Entalpi Değişim Sonuçları.....	33
Çizelge 3.5 Jeotermal Kuyu Giriş Parametreleri ve Değerleri	36
Çizelge 3.6 Isı Değiştirici Giriş Parametreleri ve Değerleri	37
Çizelge 3.7 Türbin Giriş Parametreleri ve Değerleri	39
Çizelge 3.8 Kondenser Giriş Parametreleri ve Değerleri	41
Çizelge 3.9 Pompa Giriş Parametreleri ve Değerleri	42
Çizelge 4.1 ORC Sisteminde Tasarımı Yapılan Blokların Çıkış Parametreleri.....	58

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1.1 AFJET Genel Görünüm	3

1. GİRİŞ

Tez çalışmasının birinci kısmında, ele alınan Afyon Jeotermal Elektrik Santrali'nin (AFJES) tanıtımı yapılmıştır. İkinci kısımda ise yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynaklar içerisinde yer alan jeotermal enerjiden bahsedilmiştir. Jeotermal enerji kaynağının Dünya'da ve ülkemizdeki durumu ve jeotermal enerji kaynağına bağlı olan elektrik üretim kapasitesine dair raporlar sunulmuştur. Ayrıca, jeotermal elektrik üretim santral çeşitleri ile santrallerde verimliliği artırmak amacıyla kullanılan Organik Rankine Çevrim (ORC) sisteminden bahsedilmiştir.

Üçüncü kısımda ise, Organik Rankine Çevrimi'nde yer alan elemanların (jeotermal kuyu, ısı değiştirici, türbin, kondenser, pompa) modellenmesinde gerekli olan matematiksel denklemlere yer verilmiştir. Elemanların MATLAB/Simulink'te modellenmesi gerekli olan değerler için öncelikle EES programı kullanılmıştır. Bu programda, sıcaklık ve debi değişimlerine bağlı olarak her bir elemanın giriş ve çıkışındaki entalpi (maddenin yapısında depoladığı her türden enerjilerin toplamı) değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, Jeotermal Organik Rankine Çevrim sisteminde yer alan her bir elemanın blok diyagramları tek tek modellenmiştir. Ardından jeotermal elektrik üretim sisteminin şebekeye entegrasyonu yapılmıştır. Şebekede yer alan elemanların parametreleri ve senkronize çalışabilmesi için gerekli olan değerleri bu kısımda belirtilmiştir.

Dördüncü kısımda ise, şebekeye entegre edilmiş jeotermal elektrik üretim sisteminden gerilim, akım, güç ve frekans değerleri dikkate alınmıştır. Eş zamanlı çalışabilmeleri için jeotermal elektrik üretim sistem-şebeke arasındaki gerilim ve frekans dengelenme süreleri ve dengeleme süresinden itibaren alınan akım, gerilim, frekans ve rampa çıkış açısı değerleri tek tek gösterilmiştir. Son kısımda ise, elde edilen grafik ve değerlere göre jeotermal elektrik üretim sisteminin performansı göz önünde bulundurularak analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

Sanayileşme, Dünya nüfusunun artışı, teknolojik gelişmeler enerjiye olan ihtiyacı artırır. Fosil yakıtların (kömür, doğalgaz, petrol) rezervlerinin azalması ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle, sürdürülebilir enerji kaynakları alternatif oluşturmuştur. Herhangi bir enerji türü tükenme sürecinden daha hızlı veya aynı süreçte kendini yenileyebiliyorsa bu

tip kaynaklara yenilenebilir enerji denir (Satman 2003).

Fosil yakıtlar, ozonun delinmesi, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olur. Yenilenebilir enerji kaynakları ise çevre dostudur ve daha ucuza enerji elde edilebilir. Enerji kaynaklarına göre yenilenebilir ve yenilemeyen olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir.

Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

- Fosil Kaynaklı Enerji
- Kömür
- Petrol
- Doğal Gaz
- Nükleer Kaynaklı Enerji
- Çekirdeksel füzyon (Nükleer)

Yenilenebilir Enerji Kaynakları

- Güneş Kaynaklı
- Rüzgâr Kaynaklı
- Biyokütle Kaynaklı
- Hidroelektrik Kaynaklı
- Hidrojen Kaynaklı
- Dalga, Akıntı, Gelgit Kaynaklı
- Jeotermal Kaynaklı Enerji

1.1 AFJET A.Ş Tanıtılması

Kısa adı Afjet olan Afyon Jeotermal Turizm ve Ticaret A.Ş; jeotermal su kaynaklarıyla bölgesel ısıtma tesisleri kurmak, dönüş suları ile seralara su temin etmek amacıyla 14.02.1994 tarihinde kurulmuştur. Güncel sermayesi 4 milyon TL olan AFJET'in ortakları; Afyonkarahisar İl Özel İdare Müdürlüğü (%59,42), Afyonkarahisar Belediyesi (%26,66), Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası (%6,03) ve diğer küçük ortaklıklar (%7,89)' dir. AFJET toplam 9 yönetim kurulu üyesinden oluşmaktadır (İnt. Kyn. 1).



Resim 1.1 AFJET Genel Görünüm (İnt. Kyn. 1).

Ayrıca termal turizm tesislerine ve seralara da jeotermal su temini ile hem gelirini artırmakta hem de bölgede bulunan turizm otellerin konaklama maliyetlerinin azalmasına konaklama konfor ve kalitesinin artmasına, Afyonkarahisar kenti için ise hava kirliliğinin azalmasına yaptığı katkıyla çok yönlü fayda sağlamaktadır (İnt. Kyn. 1).

Bunun yanında dünyanın, ülkemizin ve AFJET'in en büyük gider kalemlerinden olan elektrik giderlerini minimuma düşürme amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda; Jeotermal kaynak kapasitesi ve sıcaklıklarına uygun elektrik üretim teknolojileri araştırılmıştır. Düşük sıcaklıklarda (<150°C) tercih edilen teknoloji Organik Rankine Çevrimidir (ORC). ORC teknolojisinde sudan daha düşük sıcaklıkta kaynayan, yüksek moleküler ağırlıklı bir yardımcı akışkan kullanılmaktadır. Bu özellik, ekonomik enerji üretimi için geleneksel olarak çok düşük kabul edilen ısı kaynaklarından ısı elde eden Rankine Çevrimi'ne imkân tanımaktadır. Bu sistem ışığında AFJET mevcut kapasitesinin bir bölümünü bu alanda kullanmak üzere projelendirmektedir. 3 MW/h üretim kapasitesi ile Elektrik Üretim Santrali faal durumda çalışmaktadır (İnt. Kyn. 1).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji, doğada sınırsız olan sürekli olarak kendini yenileyebilen kullandıkça bitmeyen enerjidir. Bunlar rüzgâr, jeotermal, hidrojen, med-cezir, akıntı, güneş, biyokütle, hidrolik ve dalga enerjileri gibi kaynaklardır. Türkiye’de ve Dünya’da son 15 yılda yenilenebilir enerji üretim ve tüketimine verilen önem artmıştır. Ancak bu enerji potansiyelinin tümünden yararlanılmamaktadır. Güneş, jeotermal ve rüzgâr gibi kaynakların potansiyelinin az bir kısmından, hidrolik enerjinin potansiyelinin ise yarısından faydalanılmaktadır. Güneş enerjisi sınırsız enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Fakat rüzgâr, dalga, gel-git ve akıntı enerjileri ve jeotermal potansiyel bakımından sınırlıdır (Erdoğan 2016).

2.1.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi çok büyük tükenmez enerji kaynağıdır. Dünya tarafından yakalanan güneşten gelen güç yaklaşık $1,8 \times 10^{11}$ MW olup, tüm ticari enerji kaynaklarının Dünya’daki mevcut tüketim oranından binlerce kat daha büyüktür. Prensip olarak güneş enerjisi şimdiki ve gelecekteki tüm enerji ihtiyaçlarını sürekli olarak karşılayabilir, böylece alışılmadık enerji kaynaklarının en umut vadedenlerden biri haline gelir (Sukhatme ve Navak 2017). Güneş pilleri (Fotovoltaik Pil) sayesinde Güneş’ten gelen ışınlar elektrik enerjisine çevrilir.

2.1.2 Rüzgâr Enerjisi

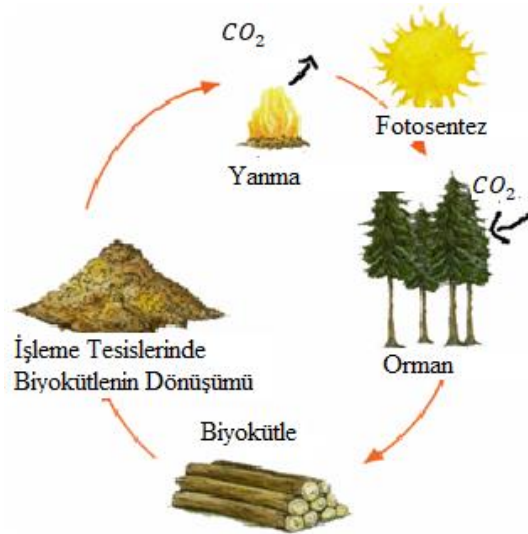
Dünya yüzeyinin değişken olmasından dolayı güneş enerjisinin yeryüzünü eşit şekilde ısıtmaması sıcaklık, basınç ve yoğunluk farklılıklarına neden olmakta ve bu farklılıklara rüzgâr denmektedir. Dünya’yı çevreleyen atmosferin atmosfer içerisindeki sıcak havayı tropik alanlardan kutup bölgelerine doğru iletmesi sonucunda güneş ışınları tropikal bölgelerde ısıyı artırırken kutuplarda ısının azalmasına neden olmaktadır. Okyanus akıntıları da Dünya ısı transferinin ortalama %30’unu oluşturmakta ve benzer şekilde

davranmaktadır. Rüzgâr enerji dağılımına yer betimsel özellikler, bölgesel ısı farklılıkları ve atmosferik akımlar neden olmaktadır (Ertürk vd. 2006).

Kısaca rüzgâr enerjisi temiz, yenilenebilir ve aslında kaynağı güneş olan bir enerji çeşididir. Rüzgâr hızı yüksek iken, pervaneler dönmeye başlar. Dönme hareketi sayesinde kinetik enerji meydana gelir. Kurulu özel sistem (rüzgâr jeneratörleri) oluşan bu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir.

2.1.3 Biyokütle Enerjisi

Yeryüzünde yaşayan canlıların atıkları ile fosilleşmiş canlıların biyolojik kalıntılarının değerlendirilmesiyle oluşan enerji türüdür. Biyokütle her türlü organik atık ile elde edilebilir. Bitki içerisinde bulunan organizmalar güneş ışığı ile havadan CO_2 (karbondioksit) alır ve havaya O_2 (oksijen) verir ve organik bir yapı oluşur. Bu organik yapıyı endüstriyel olarak yakılması ile enerji elde edilir. Fakat bu enerji elde edilirken atmosfere yüksek miktarda karbon salınır. Salınan bu karbondioksit fotosentez yapan organizmalar için hammadde olacaktır. Fakat yakım işlemi miktarı fazla olur ve sürece yayılmazsa çevreye zararı olur. Küresel ısınma, su kaynaklarının kirlenmesi, gıda maddelerinin güvenilirlik potansiyelinin düşmesi gibi sonuçlar doğurabilir. Diğer yenilenebilir kaynaklar arasından biyokütle enerjisi kesintisiz enerji kaynağı sayılabilir. Dünya üzerinde yaşam var olduğu müddetçe biyokütle enerjisi vardır bu özelliği itibariyle de bu enerji gündün güne önem kazanmaktadır.



Şekil 2.1 Biyokütle Enerjisi Elde Edilme Aşamaları (İnt. Kyn. 2).

Türkiye biyokütle enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahiptir. Fakat bu yüksek potansiyel karşılığında üretim azdır. Potansiyelin kullanımının az olma nedenlerini sayacak olursak: Türkiye’de enerji ormanlarına yönelik atılan adımların yetersiz olması sayılabilir (Sözen vd. 2017).

2.1.4 Hidrojen Enerjisi

Birincil (primer) enerji kaynaklarından olan hidrojen doğada bileşikler halinde bulunur. Temiz, saydam, hafif olan bu element periyodik tablonun ilk elementidir. Su içerisinde, fosil yakıtlar içerisinde bolca bulunur. Diğer bilinen yakıt türlerine göre en fazla enerji potansiyeline sahiptir ve çevreye zararı neredeyse yoktur. Dünyada hidrojen enerjisi, elektrik, ısı ve yakıt ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Son zamanlarda en gözde uygulamalardan biri arabalar için hidrojen enerjisinin yakıt olarak kullanılmasıdır. Her ne kadar pahalı bir enerji türü olarak görünse de gelecekte teknolojinin gelişmesiyle hidrojen enerjisinin daha az maliyetle elde edilebilmesi mümkün olacaktır. Diğer bir yandan kokusuz bir gaz olması dolayısı ile, üretim esnasında meydana gelebilecek gaz kaçaqlarını anlamada güçlük çekilebilmektedir.

Hidrojen üretimi için yedi yöntem vardır. Bunlar: elektroliz, fotobiyoloji, foto elektrokimyasal çalışmalar, piroliz, buhar elektrolizi, termo-kimyasal ayrıştırma, biyokütlenin gazlaştırması olarak sınıflandırılabilir (Öztürk 2008).

2.1.5 Dalga ve Gelgit Enerjisi

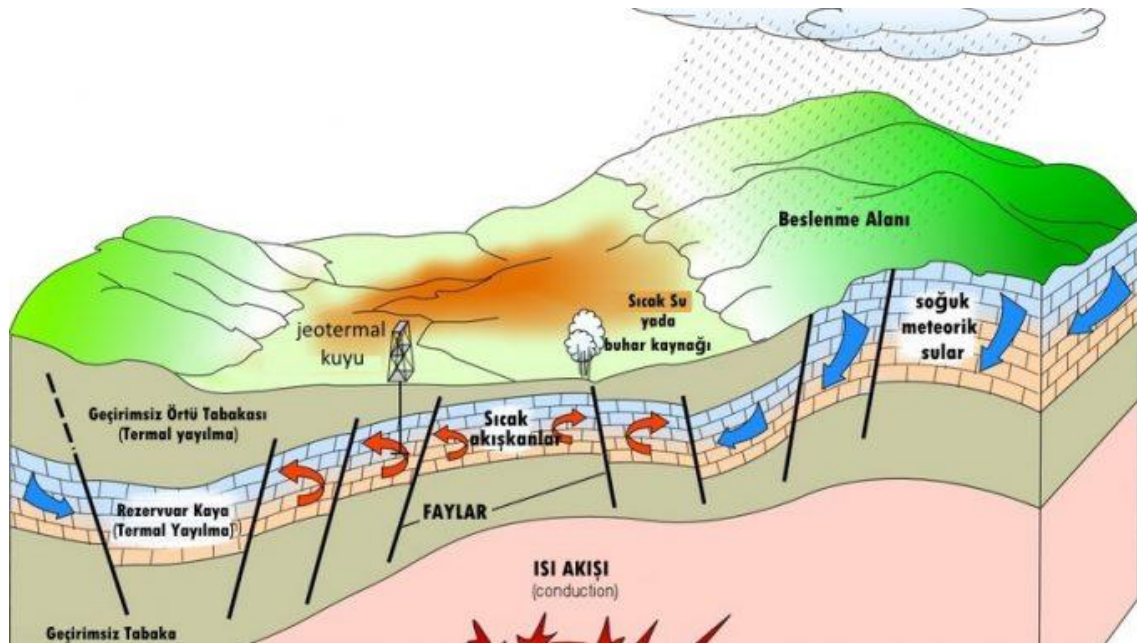
Okyanus enerjisi ya da deniz dalgası enerjisi olarak bilinen dalga enerjisi, okyanus veya deniz dalgalarının gel-git hareketinden elde edilen enerjidir. Yüzey okyanus dalgalarının dikey hareketi, dalga enerjisi teknolojileri tarafından örneğin elektrik üretimi, suyun tuzdan arındırılması ve suyun rezervuarlara pompalanması gibi yararlı işler yapmak için yakalanan çok fazla kinetik enerji içerir. Dalga enerjisi veya dalga gücü esasen dalgalardan çekilen güçtür. Rüzgâr deniz yüzeyi boyunca esiyorsa, enerjiyi dalgalara aktarır. Bunlar güçlü bir enerji kaynağıdır. Enerji çıkışı dalga hızı, dalga yüksekliği, dalga boyu ve su yoğunluğu ile ölçülür. Dalgalar ne kadar güçlü olursa, o kadar güç üretilir. Yakalanan enerji daha sonra elektrik üretimi, enerji santralleri veya su pompalamak için

kullanılabilir. Dalga jeneratörü tesislerinden güç kullanmak kolay değildir ve bu nedenle dünya çapında çok az sayıda dalga jeneratörü tesisi olmasının nedeni budur (İnt. Kyn. 3).

Ülkemiz üç tarafı denizlerle çevrili olan, jeopolitik konumu sayesinde dalga enerjisi elde etmek için şanslı ülkeler arasındadır. Yapılan araştırmalar göz önünde bulundurulduğunda en iyi elektrik üretim kapasitesinin olduğu yer 6,6 kW/m-7,6 kW/m ile Kalkan açıkları olduğu göstermektedir. Bu konuda değerli hocam Prof. Dr. Yüksel Oğuz 'un da bulunduğu bir ekip sayesinde yürütülmekte olan çalışmalar vardır.

2.1.6 Jeotermal Enerji

Jeotermal kelimesi Yunan kökenli geo (Dünya) ve termal (ısı) kelimelerinin birleşmesinden oluşmaktadır (İnce ve Güden 2005). Jeotermal kaynak, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, sıcaklıkları sürekli olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su ve buhar olarak tanımlanabilir. Jeotermal enerji ise bunlardan dolaylı veya doğrudan her türlü faydalanmayı kapsamaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı 2001).



Şekil 2.2 Jeotermal Su Oluşumu Gösterimi (İnt. Kyn. 4).

2.1.7 Hidroelektrik Enerjisi

Durgun haldeki suyun potansiyel enerjisi, akarken suyun hareket yani kinetik enerjisi bulunur. Bu kinetik enerjiyi türbinler elektrik enerjisine çevirir. Kinetik enerji formülünden;

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

KE: Kinetik enerji (J)

m: Kütle (kg)

v: Cismin hızı veya cismin konumunu değiştirdiğindeki sürati (m/s)

Yola çıkıldığında; su ne kadar yüksekte ise o kadar hızlı akacaktır. Bu hızlı akım sayesinde daha çok hidroelektrik enerjisi elde edilir.

Hidroelektrik santraller ile elektrik üretimi, dünyada toplam elektrik üretimine yaklaşık %23 oranında katkıda bulunmaktadır. Hidroelektrik santralleri ile enerji üretimi için uygun coğrafi koşulların sağlanması gerekmektedir (Berkün vd. 2008).

2.2 Jeotermal Enerji

Jeotermal (jeo-yerküre, termal-ısı anlamına gelir) yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji de bu jeotermal kaynaklardan ve bunların oluşturduğu enerjiden doğrudan veya dolaylı yollardan faydalanmayı kapsamaktadır (İnt. Kyn. 5).

2.2.1 Jeotermal Enerjinin Özellikleri

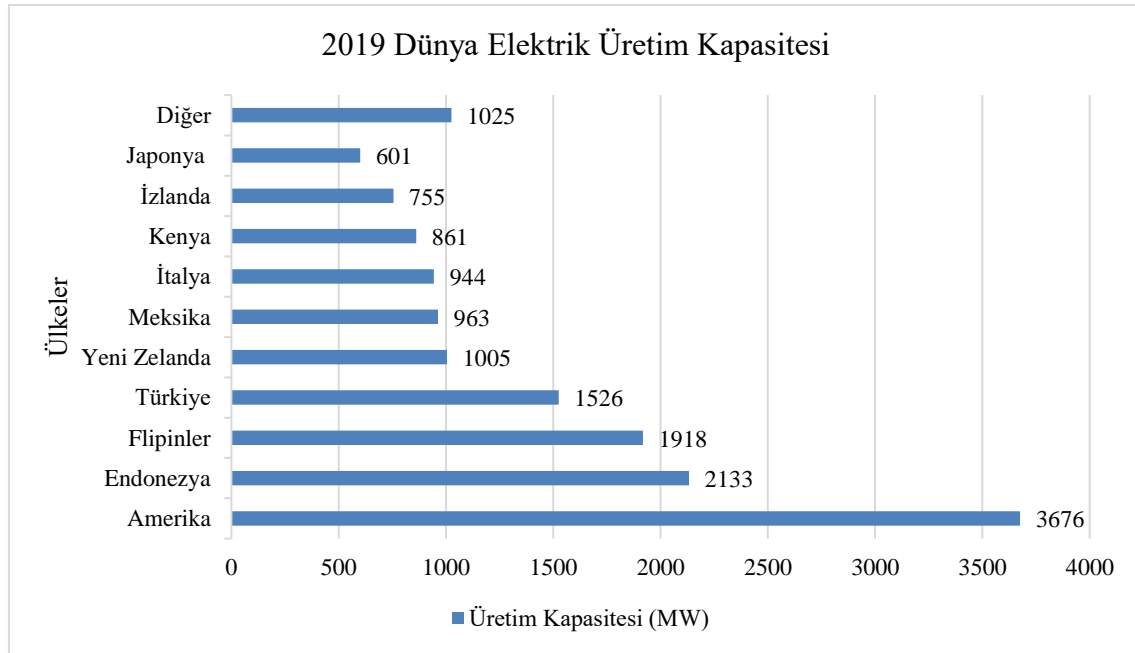
Jeotermal enerjinin sahip olduğu birçok avantaj vardır;

Fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz vb.) gibi yakılmadan kullanılabilir. Dolayısıyla ürettiği karbondioksit diğer enerji türlerine nazaran daha düşüktür. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgâr enerjisinin aksine kesintisiz sürekli bir enerji sağlar ve ucuzdur.

Dezavantajı ise; çevreye yaydığı çürük yumurta kokusuna sebep olan hidrojen sülfid (H_2S) gazıdır. Ayrıca yıllarca sıcak olan sahalar, zaman içinde sıcaklıklarını kaybedip soğuyabilirler.

2.2.2 Dünya’da ve Ülkemizde Jeotermal Enerji

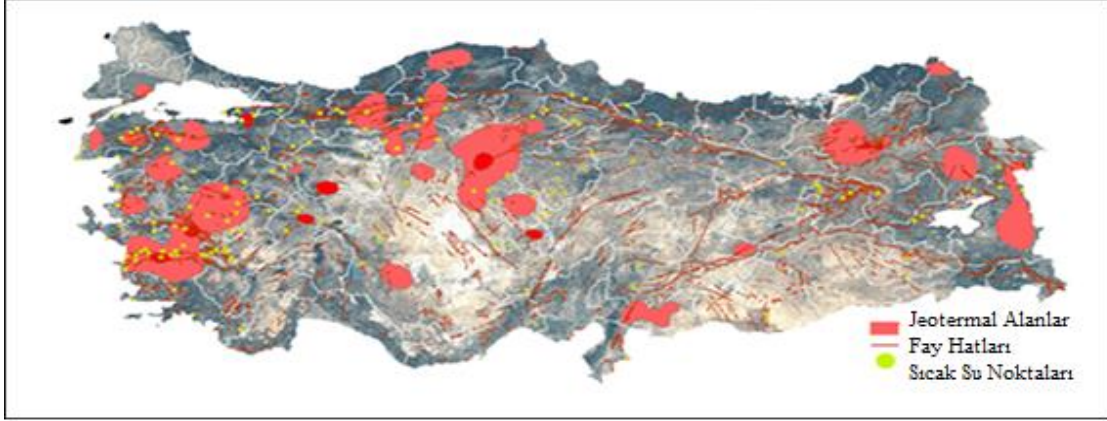
Çizelge 2.1 2019 Dünya Elektrik Üretim Kapasitesi.



*Think Geoenergy tarafından hazırlanmıştır.

Dünya üzerinde jeotermal elektrik üretim kapasitesi 2019 yılı sonu itibarıyla 15406 MW olmuştur. Think Geoenergy 2018 raporuna göre toplam üretim kapasitesi 14600 MW idi. Tahmini 806 MW büyümesi ile son 20 yılın en büyük büyüme kapasitesine ulaşmıştır. Bütün bu değerler tahmini değerler olarak verilmiştir. Çünkü kurulu santrallerin tam üretim kapasitelerinde çalışıp çalışmadığı bilinmemektedir.

Türkiye enerji kaynakları potansiyeli bakımından jeopolitik konumu da sayesinde zengin bir ülkedir.



Şekil 2.3 Türkiye Jeotermal Alanlar ve Fay hatları (İnt. Kyn. 6).

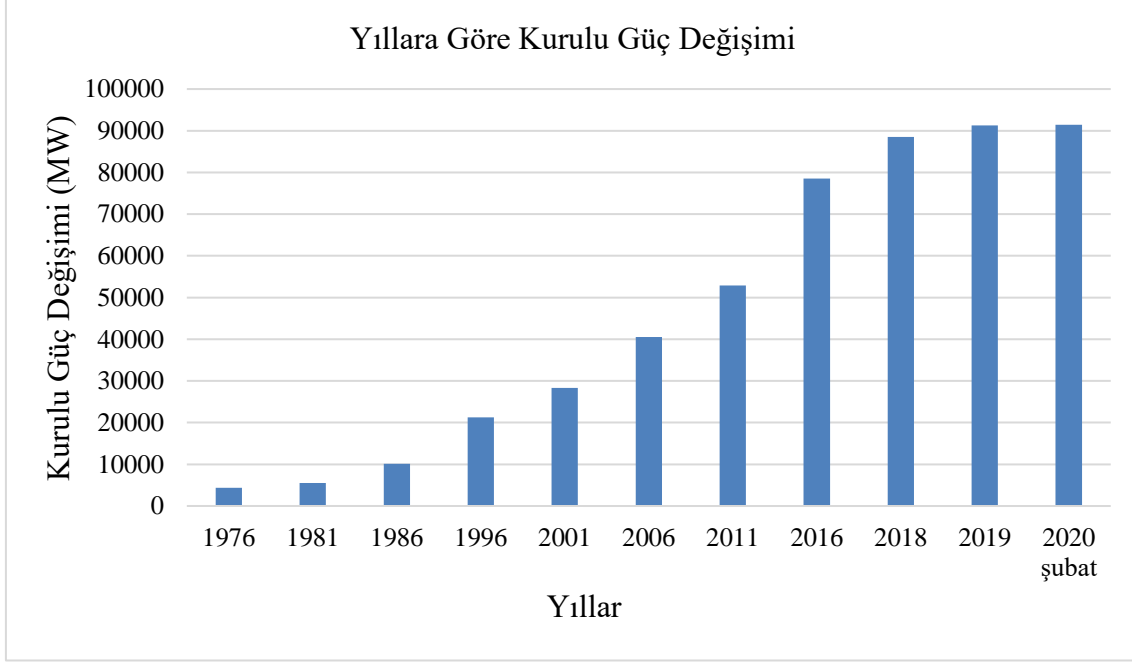
Jeotermal enerji, fay hatlarının tektonik hareketleri vasıtasıyla yeryüzüne ulaşan mucizevi bir enerji türüdür. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, jeotermal sahaların en çok bulunduğu yer, fay hatları üzerindedir.

Ülkemizin jeotermal potansiyeli oldukça yüksek olup potansiyel oluşturan alanların %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, çeşitli endüstriyel uygulamalar vb.) için, %10' u ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur (İnt. Kyn. 7). Jeotermal enerji potansiyelinin en fazla olduğu iller; Manisa, Aydın, Denizli ve Çanakkale'dir.

Çizelge 2.2 Yıllara Göre Kurulu Güç Değişimi.

Yıllara Göre Kurulu Güç Değişimi											
1976	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2018	2019	2020 Şubat
4364	5538	10115	17209	21249	28332	40565	52911	78497	88551	91270	91405,9

* Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yayınlanan verilere dayanılarak hazırlanmıştır.



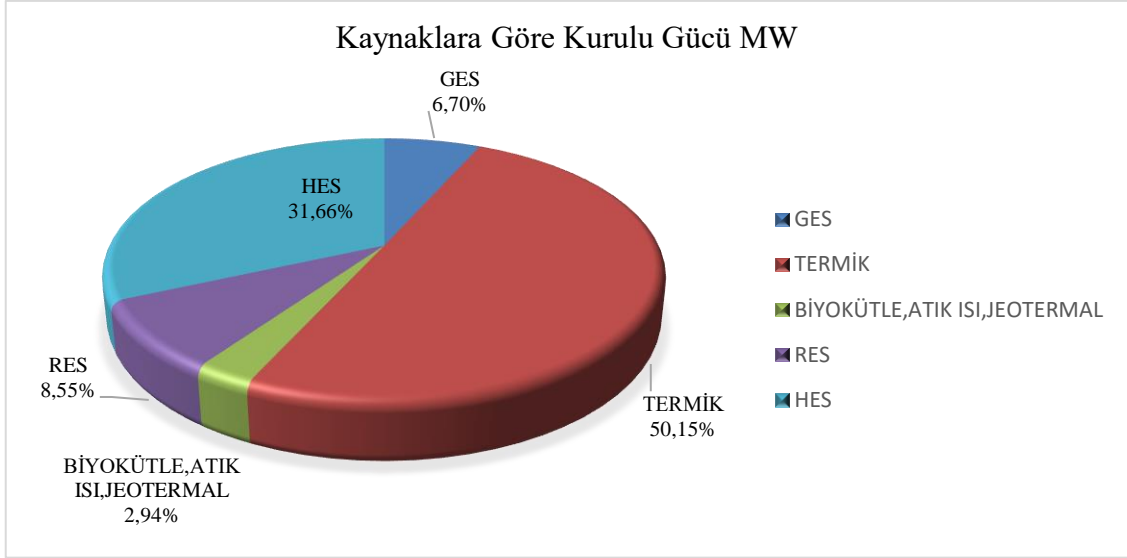
Şekil 2.4 Yıllara Göre Kurulu Güç Değişimi Grafikselsel Gösterim.

Türkiye kurulu gücünün yıllara göre değişimi dikkate alındığında; özellikle 2011 yılından sonra yükseliş olduğu görülmüştür. Bu yükselişin ana sebeplerinden biri; Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından 2011 yılında yayınlanan yönetmelikte ‘Lisanssız Elektrik Üretimine’ uygulanabilmesi mümkün olmuştur. Bu yönetmeliğin asıl amacı, küçük ölçekteki işletmelerin ülke ekonomisine kazandırılması, gün geçtikçe enerjiye artan talebe etkin şekilde cevap verebilme ve enerji üretimi esnasında meydana gelen veya gelebilecek kayıpların en aza indirgenmesidir.

Çizelge 2.3 Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Haziran Ayı Kaynaklara Göre Üretim Tesisleri Kurulu Gücü Özet Raporu.

KAYNAK	GES	TERMİK	BİYOKÜTLE, ATIK ISI, JEOTERMAL	RES	HES	TOPLAM
KURULU GÜCÜ (MW)	6166,58	46188,98	2710,61	7876,94	29154,10	92097

* Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yatırımlar Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanmıştır.

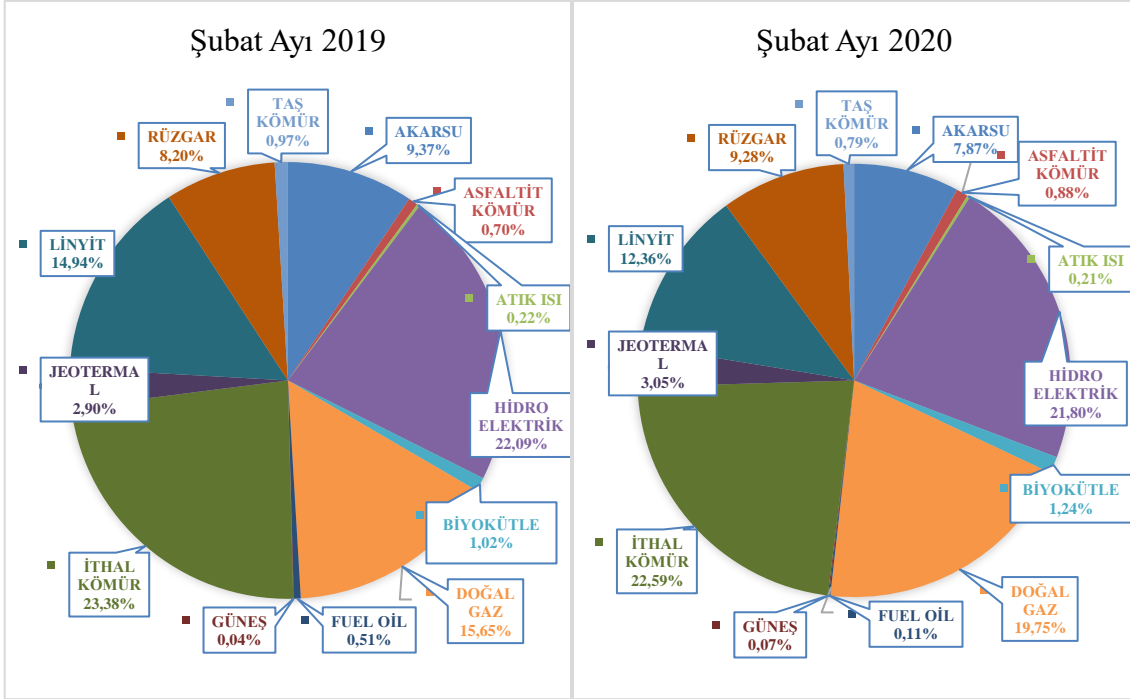


Şekil 2.5 Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Haziran Ayı Kaynaklara Göre Üretim Tesisleri Kurulu Gücü Özet Raporu Grafikselsel Gösterim.

Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Haziran Ayı Özet Raporu'na göre, Türkiye'deki elektrik üretim tesislerinin kaynaklara göre kurulu güç grafiğine göre biyokütle, atık ısı, jeotermal enerjinin %2,94' lük bölümü kapsadığı görülmüştür. Üstelik jeotermal enerji santrali üretim maliyeti fazladır fakat uzun vadede yatırımcısına daha çok katkı sağlar.

Çizelge 2.4 Şubat Ayı 2019-2020 Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi.

Şubat Ayı 2019		Şubat Ayı 2020	
Akarsu	2 135 045,16	Akarsu	1 894 490,96
Asfaltit Kömür	159 951,98	Asfaltit Kömür	212 931,53
Atık Isı	50 452,18	Atık Isı	51 360,51
Hidroelektrik	5 030 812,94	Hidroelektrik	5 247 722,90
Biyokütle	232 037,45	Biyokütle	299 260,50
Doğal Gaz	3 564 381,58	Doğal Gaz	4 754 235,51
Fuel Oil	116 343,30	Fuel Oil	25 546,90
Güneş	9 807,58	Güneş	17 437,52
İthal Kömür	5 325 844,49	İthal Kömür	5 438 696,79
Jeotermal	659 529,49	Jeotermal	733 185,03
Linyit	3 403 311,15	Linyit	2 976 628,20
Rüzgâr	1 868 266,63	Rüzgâr	2 232 883,22
Taş Kömür	220 416,00	Taş Kömür	189 256,55
Toplam	22 776 199,93	Toplam	24 113 636,12
İhracat	321 807,91	İhracat	184 272,00
İthalat	175 964,00	İthalat	284 159,00
Tüketim	22 630 356,02	Tüketim	24 213 523,12



Şekil 2.6 Şubat Ayı 2019-2020 Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi Yüzelik Dilim Grafikselle Gösterimi (İnt. Kyn. 8).

Kaynaklara göre elektrik üretimi 2019-2020 Şubat ayı verilerini incelediğimizde; akarsu, fueloil, linyit ve taş kömüründen üretilen elektrik düşmesine rağmen, jeotermal, hidroelektrik rüzgâr, güneş kaynaklı elektrik üretim kapasiteleri artmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi, elektrik tüketimi bir önceki yıla göre artmıştır. 2020 Şubat verilerine göre elektrik üretimimizin yaklaşık %3,2'lik kısmını jeotermal enerjiden karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin olan ülkemiz, ileri yıllarda üretim kapasitesini daha çok artırmayı hedeflemektedir.

İhracat ve ithalat verilerini göz önüne aldığımızda, önceki yıla göre ithalat artmış fakat ihracat azalmıştır. Anlaşıldığı üzere, Türkiye enerji konusunda bir önceki yıla göre diğer ülkelere olan bağımlılığı artmıştır. Ayrıca Dünya'yı saran salgın hastalık koronavirüs tehdidi nedeniyle ülkeler arası ithalat ve ihracat azalmıştır. Covid-19 virüsü birçok ülkelerde olduğu gibi ülkemiz de etkilenmiştir. Bu sebeple üretimin azalmış olabileceği öngörülmektedir.

Jeotermal enerjinin yerli olması sebebiyle ülkemizin petrol ve türevlerine olan dışa bağımlılığın azaltılmasında ayrıca döviz kaybının önlenmesi amacıyla ilk sırada değerlendirilmesi gerekmektedir. Anadolu'nun Batı ve Kuzeybatı bölgelerinde yüksek

sıcaklıklı ve elektrik üretimine elverişli kaynaklar, Orta ve Doğu bölgelerinde ise ısıtmaya elverişli düşük sıcaklıklı kaynaklar bulunduğu bilinmektedir. Jeotermal kaynaklı santrallerin yatırım süreci diğer santrallere oranla daha kısa olup ortalama olarak üç yıldır. Jeotermal kaynaklı enerjide özellikle mekanik aksama bağlantılı uygulamalarda yerli teknoloji geliştirilip uygulanabilir. Bu bağlamda tüm sahalarda geliştirilme çalışmaları devam etmektedir (Şahin 2016).

2.2.3 Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları

Çizelge 2.5 Jeotermal Akışkanın Sıcaklığa Göre Kullanım Alanları (Lindal 1973).

SICAKLIK °C	KULLANIM ALANI		
180	Elektrik üretimi, Amonyum absorpsiyonu ile soğutma	Elektrik ve Endüstri Buhar Üretimi	
170	Ağırsu (D_2O) ve hidrojen sülfür eldesi, Diyatomitlerin kurutulması		
160	Kereste kurutulması, balık vb. yiyeceklerin kurutulması		
150	Bayer's yoluyla alüminyum ve diğer kimyasal madde üretimleri		
140	Konservecilikte		
130	Şeker endüstrisi, tuz üretimi		
120	Saf su üretimi, tuzluluk oranı artırılması		
110	Kerestecilik, çimento kurutma (yosun, et, sebze)		Isıtma
90	Balık kurutma		
80	Ev ve sera ısıtılması		
70	Soğutma (alt sıcaklık sınırı)		
60	Sera, kümes ve ahır ısıtma		
50	Mantar yetiştirme, balneolojik banyolar		
40	Toprak ısıtma, kent ısıtılması (alt sınır)	Kaplıca, sağlık ve termal turizm tesisleri	
30	Yüzme havuzları, fermentasyon, damıtma		
20	Balık çiftlikleri		

*Jeotermal sıvı 20°C-110°C arası sıcak su fazında, 110°C- 180°C arası buhar fazındadır.

Jeotermal kaynaklar yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bugün için ülkemizde elde edilen jeotermal enerjiden elektrik üretimi, ısıtma (sera ve konut), termal ve sağlık turizmi, endüstriyel mineral üretimi, balıkçılık, kurutmacılık vb. gibi alanlarda yararlanılmaktadır. Jeotermal Enerji uygulamalarında ilk elektrik üretimi 1975 yılında MTA Genel Müdürlüğü tarafından kurulan ve 0,5 MWe güce sahip Kızıldere Santrali ile başlatılmıştır (İnt. Kyn. 9).

Jeotermal enerji sıcaklıklarına göre sınıflandırılacak olursa, 20°C – 70°C arası düşük sıcaklık, 70°C – 150°C arası orta sıcaklık, 150°C ve daha fazla olana yüksek sıcaklıklı olmak üzere üç ana başlıkta inceleyebiliriz. Jeotermal akışkan (140°C-180°C) yüksek sıcaklıkta iken elektrik ve endüstri buharı üretiminde kullanılır. Bunlar; konservecilik, Bayer's yoluyla alüminyum ve diğer kimyasal madde üretimleri, kereste ve balık vb. yiyeceklerin kurutulması, ağır su ve hidrojen sülfid üretimi, diyatomitlerin kurutulması, elektrik üretimi ve amonyum absorpsiyonu ile soğutma. Düşük ve orta sıcaklığa (20 °C - 130 °C arası) sahip olan jeotermal enerji de başta ısıtma sistemlerinde kullanılır. Bunlar; ev ve sera ısıtması, ahır sera kümes ısıtması, mantar yetiştirme, balık çiftlikleri ve kaplıcalardır. Ayrıca Amerika ve Japonya'da yolda biriken karları eritmek amacıyla da kullanıldığı bilinmektedir. Genelde yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretilse de günümüzde modern sistemler sayesinde orta sıcaklıktaki jeotermal enerjiden elektrik üretimi sağlanabilmektedir.

Kullanım şekline göre sınıflandırıldığında da doğrudan ve dolaylı kullanım olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan kullanım jeotermal suyun direkt olarak ısıtma, sıcak su ve özellikle sera ısıtmalarında kullanılmasıdır. Kaplıcalar da buna örnek gösterilebilir. Direkt olarak kullanım dolaylı kullanıma oranlara daha verimlidir. Dolaylı kullanım ise elektrik üretimi için suya başka çevrimler uygulanmasıdır.

Çizelge 2.6 Türkiye'nin Dönüştürülebilir Jeotermal Enerji Kategorileri (İnt. Kyn. 10).

SICAKLIK ARALIĞI (°C)	DÖNÜŞEBİLİR ENERJİ (GJ)
1.SINIF (<100°C), doğrudan kullanım	4.9 E9
2.SINIF (100-180°C), doğrudan kullanım	8.0 E9
3. SINIF (180-250°C), dolaylı kullanım	1.3 E6

Çizelge 2.6'ya bakıldığında dönüştürülebilir enerji bakımından en büyük enerjiye sahip olan 2. Sınıf doğrudan kullanıma sahip olan jeotermal akışkandır.

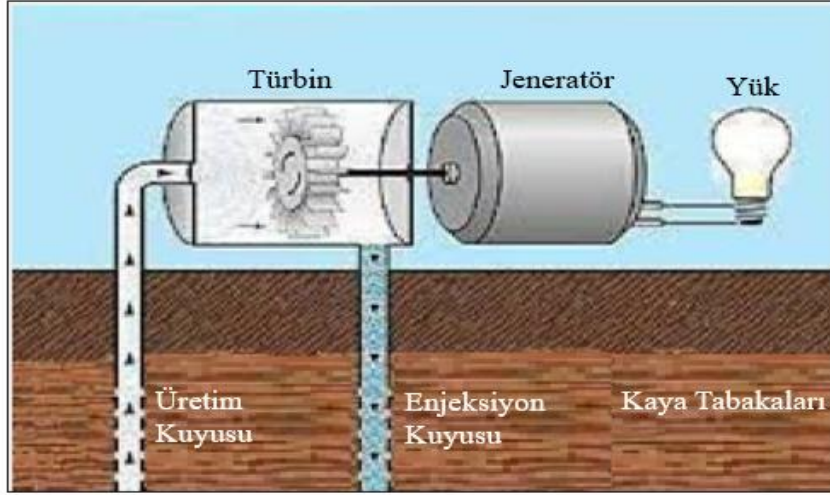
2.2.4 Jeotermal Elektrik Santral Çeşitleri

Çıkarılan jeotermal akışkanın haline bağlı olarak elektrik üretimi için farklı çevrimler kullanılır. Türbinin bir enerji kaynağını, dönüş hareketine çevirmesi için buhar kullanılır. Anılan buharın direk rezervuarlardan gelen akışkan olması durumu ya da kullanılan akışkanın farklı olması durumuna göre elektrik santralleri üçe ayrılır. Kullanılan ikili akışkanın kaynama noktası daha düşük olduğu için kısmen düşük sıcaklıktaki rezervuarlarda kullanılabilir. (Rezervuarlarda en düşük sıcaklık 150°C üzerinde olması tavsiye edilir). Bu durumda ısı değiştiriciler birinci akışkan ile ikili akışkan arasında ısı transferini sağlarlar (Öztemir 2011).

Kısaca jeotermal enerjiden elektrik üretimi derinlikte bulunan 50°C - 400 °C deki su veya su buharı yerden yüzeye pompalanır. Sular veya buhar türbin çarklarını döndürerek giren mekanik enerjiyi jeneratörler sayesinde elektrik enerjisine çevirir. Jeotermal elektrik santral çıkışında elektrik enerjisi, sıcak su ve atık sudur.

2.2.4.1 Kuru Buhar Tipi Jeotermal Elektrik Santrali

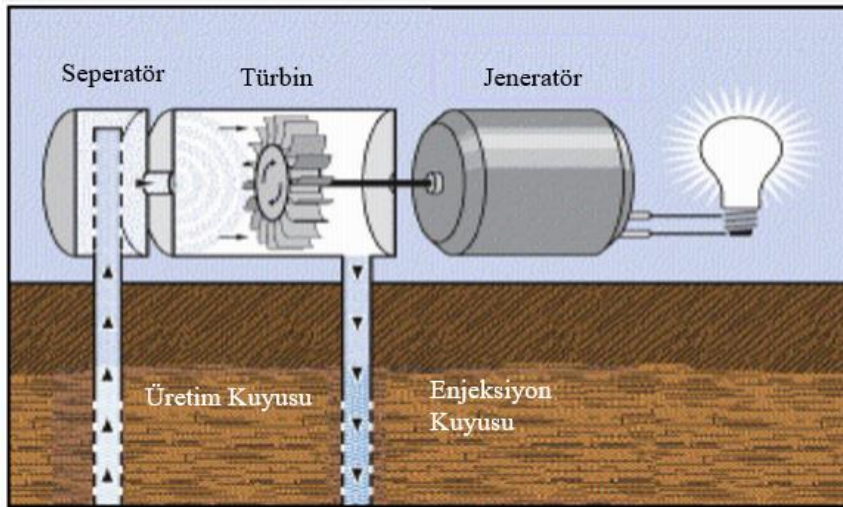
Kuru buhar tipi veya doğrudan buhar santralleri, buharların çok olduğu rezervuarlarda kullanılır. Kaynaklardan kuru, doymuş buhar üretilir. Birkaç sondaj kuyusundan gelen buhar, borularla direkt olarak elektrik üreten türbine gider. Türbine giden su buharı yaklaşık 180°C - 225 °C sıcaklığa sahiptir. Bu türbin jeneratörü tahrik eder. Buhar türbini döndürmek için direkt olarak buhar kullanılmış olur. İletim esnasında oluşan yoğunlaşmayı, boru hatları boyunca içerisinde olan toz ve kaya parçacıklarını ortadan kaldırmak için ayırıcılar kullanılır. Maliyeti düşük olan bu sistemin performans açısından değerlendirildiğinde de verimi düşüktür.



Şekil 2.7 Kuru Buhar Tipi Jeotermal Elektrik Santrali (İnt. Kyn. 11).

2.2.4.2 Flash Tipi

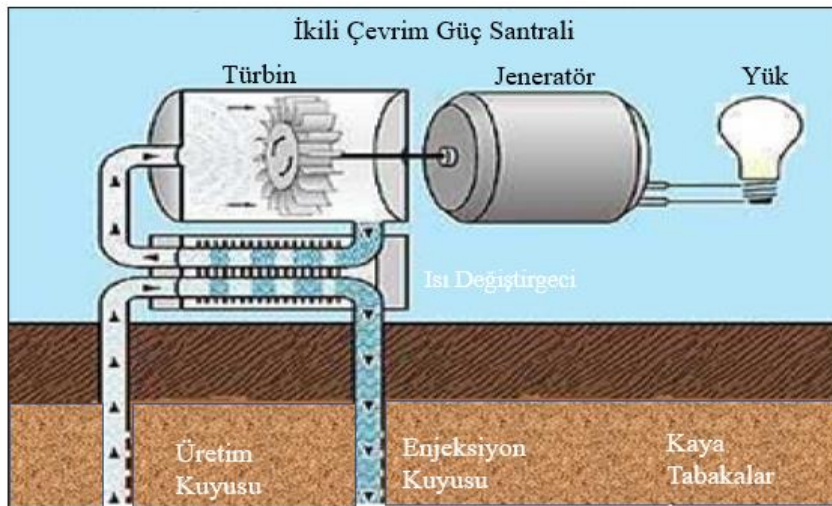
Dünya’da en çok karşılaşılan jeotermal kaynak tipi, iki fazın da (buhar-su) beraber olduğu rezervuardır. Çıkarılan jeotermal akışkan genel olarak doymuş sıvı-buhar halindedir (Ercan 2017). Sıcaklığı yüksek olan su ($182\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’den fazla) düşük basınçtaki tanka, yüksek basınç uygulanarak iletilir. Bu işlem suyun hızla buhar halini alması içindir. Ayrıştırıcı (separatör) yardımıyla da su ve buhar birbirinden ayrılarak, tahrik etmesi için türbine gönderilir. Suyun depo edildiği yerde sıvı kalırsa, su yer altına gönderilir veya bir başka depo alanına gönderilerek aynı işlemlerden geçirilir, tekrar enerji üretimi sağlanabilir.



Şekil 2.8 Flash Tipi Jeotermal Elektrik Santrali (İnt. Kyn. 12).

2.2.4.3 Binary (İkili) Akışkan Tipi

İkili çevrim santralleri, düşük sıcaklıktaki sulara, 74° ila 177°C arasında çalışır. Bu tesisler bir “çalışma sıvısını” kaynatmak için sıcak suyun ısısını kullanır, genellikle düşük bir organik bileşik kaynama noktasıdır. Bu çalışma sıvısı daha sonra bir ısı eşanjöründe buharlaştırılır ve bir türbini çevirmek için kullanılır. Jeotermal su ve çalışma sıvısı ayrı kapalı döngülerle sınırlıdır, bu nedenle havaya emisyon yaymaz. Çünkü bu düşük sıcaklıktaki sular, yüksek sıcaklıktaki sulardan çok daha bol miktarda bulunur. İkili çevrim sistemleri geleceğin baskın jeotermal enerji santralleri olacağı öngörülmektedir. İkili işlemde jeotermal su, kaynama noktası sudan daha düşük olan sıvıyı (örneğin, izopentan, protan, freon veya amonyak) ısıtır. İki sıvı Rankine Döngüsü veya alternatif olarak Kalina Döngüsü yardımıyla ısı enerjisini jeotermal sudan “çalışma sıvısına” aktarmak için bir ısı eşanjörü kullanılarak tamamen ayrı tutulur. İkincil sıvı gaz halinde buharlaşır ve (buhar gibi) genişleyen buharın kuvveti jeneratörlere güç veren türbinleri döndürür. Enerji santrali hava soğutması kullanıyorsa, jeotermal sıvılar, yeraltı jeotermal rezervuarına geri pompalanmadan önce atmosferle asla temas kurmazlar, bu da santral emisyonunu etkili bir şekilde serbest bırakır. İkili bir santraldeki sıvı ısı eşanjörüne geri döndürülür ve kapalı bir döngü oluşturur. İkili çevrim tipi santraller, birincil (jeotermal) sıvının sıcaklığına bağlı olarak genellikle %7 ila 12 arasında verimlidir. İkili Çevrim santralinin boyutu genellikle 500 kW ve 10 MW arasında değişir (İnt. Kyn. 13).



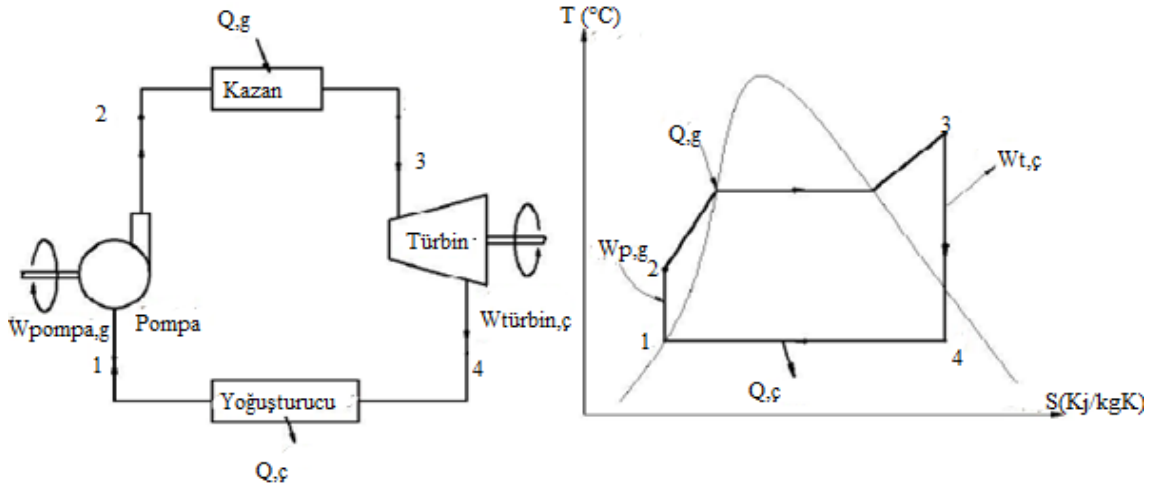
Şekil 2.9 Binary Tipi Jeotermal Elektrik Santrali (İnt. Kyn. 14).

2.3 Organik Rankine Çevrimi (Organic Rankine Cycle (ORC))

Organik Rankine Çevrim döngüsü (ORC) düşük sıcaklıktaki ısıyı güce dönüştürerek değerlendirilmesini sağlar. Düşük sıcaklıktaki ısı atık ısı, güneş ve jeotermal uygulamaları gibi çeşitli kaynaklardan temin edilebilir. Her bir uygulama ORC 'de ısı taşıyıcının kütle akış hızı ve soğutması için benzersiz sıcaklıkla ilgili özelliklere sahiptir (Lampe vd. 2014). Sistem, bazı farklılıklar dışında klasik Rankine Çevrimi'ne benzemektedir. Esasen geleneksel olarak kullanılan buhar/su yerine bir organik sıvı olan çalışan akışkan olmasıdır. Su ıslak bir sıvı olarak sınıflandırılır. Bu tür sıvılar, genleşme işlemi sırasında yoğuşmayı önlemek için aşırı ısınmayı gerektirir. ORÇ' ler için ideal akışkanlar genellikle aşırı ısınmayı gerektirmeyen sırasıyla sıfır veya pozitif eğimli "İzantropik" veya "Kuru akışkanlar" dır. Klasik Rankine Çevrimi, bir ORÇ sistemine göre aşırı ısınma ve dolayısıyla daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarını gerektirir. Bu türbin bıçakları ve kazan için pahalı yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılmasını gerektirecektir (Quoilin vd. 2013).

2.3.1 İdeal Rankine Çevrimi

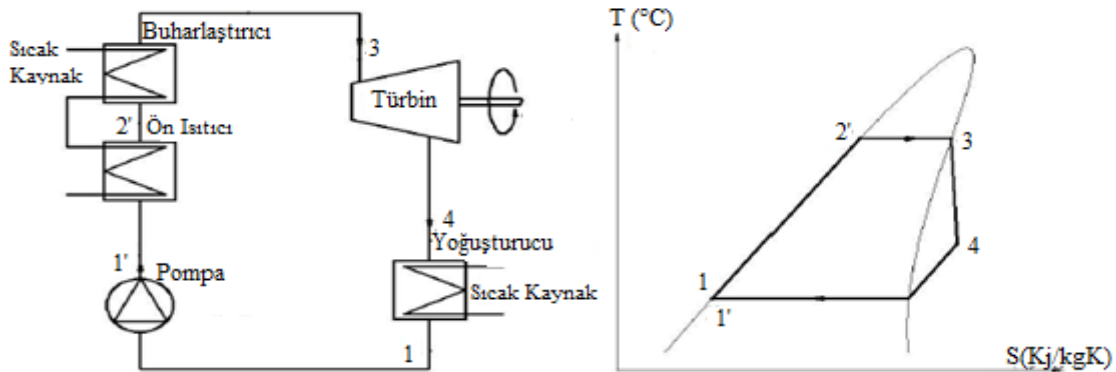
Şekil 2.10' da görülen İdeal Rankine Çevrimi' ne bakıldığında; Rankine Çevrimi dört ana elemandan oluşur. Bunlar, pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucudur. Burada su, pompaya 1 noktasında doymuş sıvı olarak girer ve izantropik bir hal değişimiyle kazan basıncına sıkıştırılır ve ardından kazana 2 noktasında sıkıştırılmış sıvı olarak girer ve 3 halinde kızgın buhar olarak çıkar. Kazan temelde büyük bir ısı değiştiricisidir. Yanma sonucunda oluşan gazlardan, nükleer reaktörden veya diğer kaynaklardan sağlanan ısı burada sabit basınçta, suya geçer. 3 noktasındaki kızgın buhar, türbinde izantropik olarak genişler ve bir mili döndürerek iş yapar. Bu mil elektrik üretimi için bir jeneratöre bağlanmıştır. Bu genişleme sırasında buharın sıcaklığı ve basıncı düşer. Buhar, türbinden çıktıktan sonar 4 noktasında kondensere girer. Bu esnada buhar, doymuş sıvı-buhar karışımı halindedir. Su, 1 noktasından doymuş sıvı halinde çıkar ve tekrar pompaya girerek döngüsünü tamamlar (Ergün vd. 2016).



Şekil 2.10 İdeal Rankine Çevrimi ve T-S Diyagramı (Ergün 2014).

2.3.2 Basit ORC Sistemi

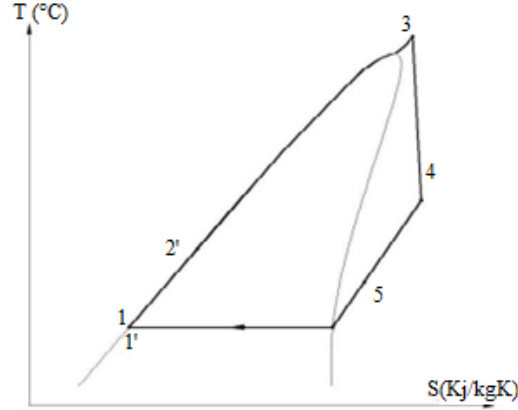
Basit Organik Rankine Çevrimi dört ana elemandan oluşur, bunlar; pompa, buharlaştırıcı, organik türbin ve yoğuşturucudur. Çevrimde kullanılan organik akışkan pompa aracılığıyla basınçlandırılarak buharlaştırıcıya gönderilir, buharlaştırıcı olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir, yenilenebilir bir kaynaktan alınan ısıyı, organik akışkana aktarır. Bu işlem sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Ardından organik türbine gönderilerek mekanik işe dönüştürülür. Daha sonra yoğuşturucuya dönerek tekrar sıvı hale gelir. Çevrim bu döngüde devam eder. Basit ORC sisteminde genellikle kaynaktan elde edilen ısının kullanım verimini arttırmak için buharlaştırıcıdan sonra bir ön ısıtıcı kullanılır. Şekil 2.11'de basit ORC sisteminin çalışma prensibi ve T-S diyagramı görülmektedir (Ergün 2014).



Şekil 2.11 Basit ORC Sistemi ve T-S Diyagramı (Ergün 2014).

2.3.3 Süperkritik ORC Sistemi

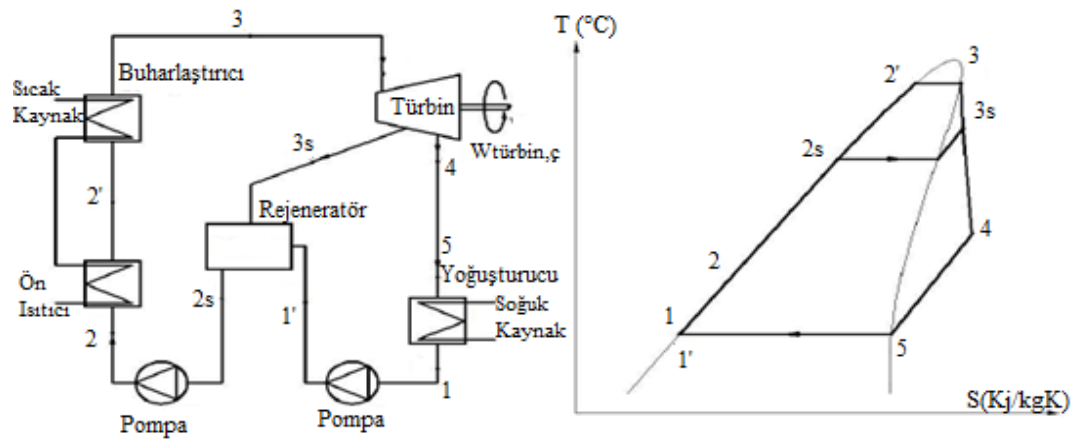
Organik akışkan, türbinde yoğunlaşır ve sıcaklığını kaybederek alt basınç bölgesine iner. Aniden basıncı artar ve o kritik değere varır.



Şekil 2.12 Süperkritik T-S Diyagramı (Ergün 2014).

2.3.4 Rejeneratif ORC Sistemi

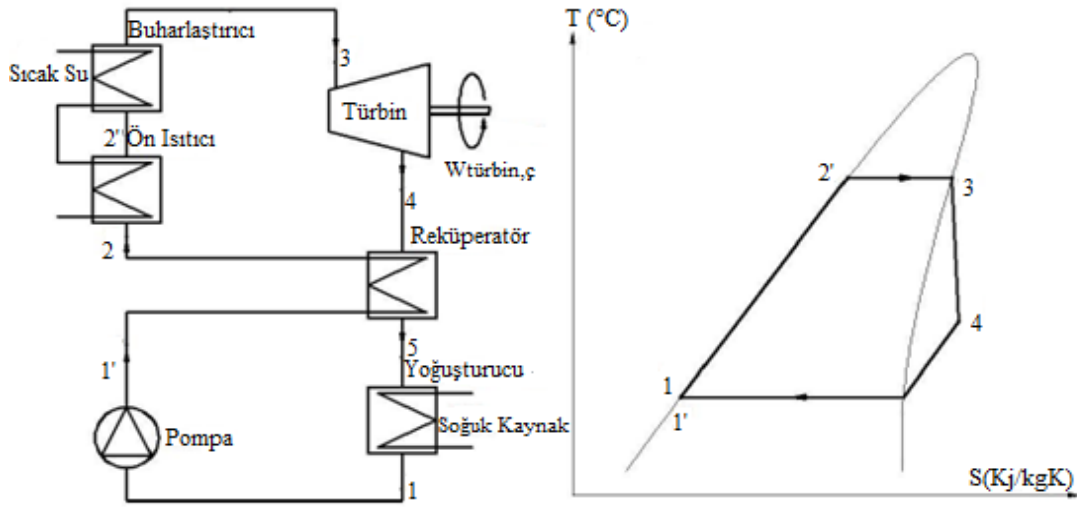
Rejeneratif ORC sistemi şekil verilmiştir. Temel ORC sistemlerden farklı olarak türbinden çıkan sıcak çalışma akışkanı ile pompadan çıkan soğuk çalışma akışkanı arasında ısı transferini sağlamak için ısı değiştiricisi vardır. Rejeneratif kelimesi çevrim içerisindeki ısının yeniden çevrim içinde oluştuğunu ifade eder. Bundan dolayı daha az termal enerji kaynağı gerekir çünkü rejeneratör boyunca akışkana ön ısıtma uygulanır (Yılmaz 2013).



Şekil 2.13 Rejeneratif ORC Sistemi ve T-S Diyagramı (Ergün 2014).

2.3.5 Reküperatif ORC Sistemi

Reküperatörlü ORC sisteminde, basit ORC sisteminden farklı olarak türbin çıkışındaki ısı kullanıp, bu ısıyı ön ısıtıcıya girecek olan organik akışkana aktarmak için bir reküperatör kullanılır. Reküperatör sistemdeki organik akışkanın kondensere girmeden önce ısınıp atmasını aynı zamanda da ön ısıtıcıya girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansını artırır (Ergün 2014).



Şekil 2.14 Reküperatif ORC Sistemi ve T-S Diyagramı (Ergün 2014).

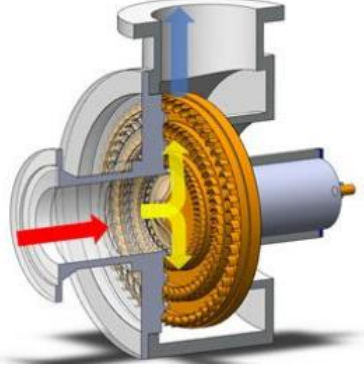
2.3.6 Buhar Türbin Tipine Göre ORC Sistemleri

Genelde Jeotermal ORC Santralleri'nde üretim ve dizaynına göre iki ana tip türbin mevcuttur; radyal ve eksenel türbin. Radyal türbinde kendi arasında radyal çıkışlı (outflow radial) türbin ve radyal girişli (inflow radial) türbin olmak üzere ikiye ayrılır (Şahin 2016).

2.3.6.1 Radyal Türbin

Radyal dış akış türbininde çalışan sıvı buharının yayılımı Şekil 2.15'te gösterilmektedir: sıvı türbin diskine aksiyal olarak merkezden girer ve tek diske monte edilmiş bir dizi düzenek yoluyla çevreye doğru (radyal olarak) yayılır. Son rotorun tahliyesinde akıntı

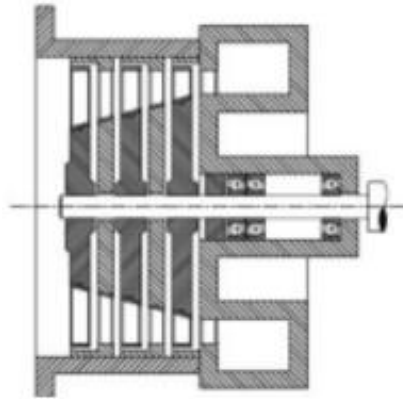
radyal bir difüzörün içinden geçer ve sonra tahliye volütü vasıtasıyla ısı eşanjörüne ve/veya sistemin yoğunlaşma bölümüne iletilir (Spadacini vd. 2015).



Şekil 2.15 Radyal Dış Akış Türbin (Spadacini vd. 2015).

2.3.6.2 Aksiyal (Eksenel) Türbin

Bu tip türbinlerde, akış eksenel yönde sisteme girer ve aynı şekilde terk eder. Radyal türbinlere göre daha yüksek güç aralığı için uygundur. Gücü 500 kW'ın üstündeki sistemlerde tercih edilmektedir. Genellikle, yüksek debi ve düşük basınç oranı ihtiyacı olan sistemlerde kullanılırlar ve yüksek basınç düşüşlerini sağlamak için çok kademeli konfigürasyonlar tercih edilir. Bununla birlikte, daha düşük entalpi düşüşünden dolayı Rankine Çevrimi'ndeki buhar türbinlerinden daha az kademeye ihtiyaç duyulur (Manente 2014).



Şekil 2.16 Aksiyal (Eksenel) Türbin (Spadacini vd. 2013).

2.3.7 ORC Sisteminin Avantajları

1. ORC' de sıcak kaynak türbinle temas halinde olmadığından, jeotermal sularda bulunabilecek kirlenici maddelerin türbine zarar verme tehlikesi yoktur. Flaş buharının jeotermal kaynaktan doğrudan buhar türbinine geçmesi sebebiyle, bu tehlike buhar türbininde mevcuttur. Jeotermal sular temiz değilse bu durum tahribata yol açabilir. Türbin bıçaklarındaki hasar elbette daha yüksek bakım maliyetine sebep olur. Zira bu durumda bıçakların sık sık yenilenmesi gerekmektedir. ORC' de, türbin bıçaklarına temas eden buharın temiz çalışma sıvısının buharı olmasından ötürü, türbinin 20 yıldan fazla sorunsuz çalışması nadir değildir (İnt. Kyn. 15).

2. Ayrıca organik çalışma sıvısı buhar türbinindeyken yüksek moleküler ağırlığı olan bir maddedir. Daha küçük olan yüksek hızlı buhar molekülleri türbine yüksek hızla çarpar, dolayısıyla bıçakların tahribatına neden olur. Bu da türbinin bakım ve yenileme sıklığını ve toplam maliyeti artırır (İnt. Kyn. 15).

3. ORC daha düşük sıcaklık ve basınçlarda çalıştığı için bileşenlerdeki mekanik ve termal gerilim, buhar türbinine kıyasla daha düşüktür. Bu da bileşenlerin ömrünü artırır (İnt. Kyn. 15).

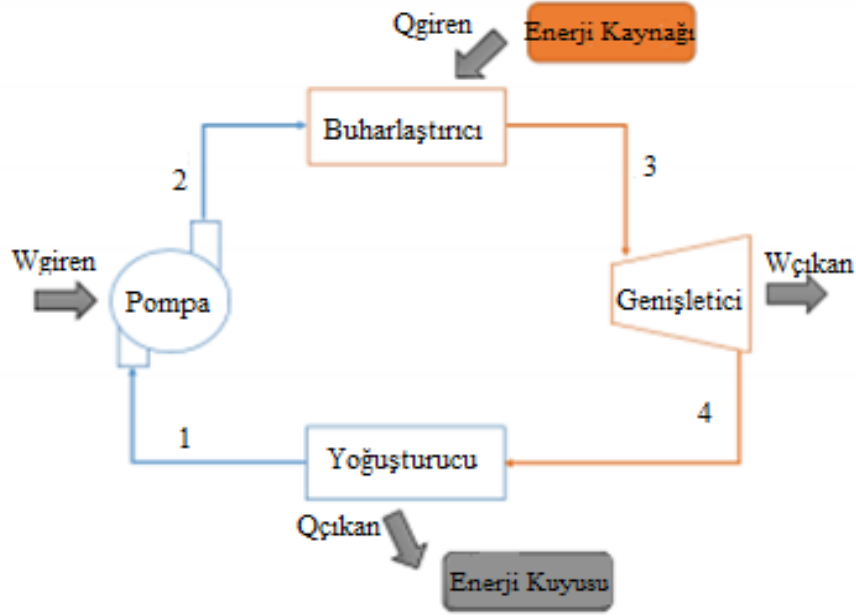
4. ORC daha düşük sıcaklık ve basınçlarda çalıştığı için çalışma alanında bir operatöre ihtiyaç yoktur. ORC personeli gerek duymadan uzaktan kontrol edilip çalıştırılabilir. Bu da çalışma maliyetini ciddi şekilde azaltır (İnt. Kyn. 15).

5. ORC'nin önemli bir avantajı da nominal enerjinin %10'u gibi kısmi yüklemelerde bile nispeten daha yüksek verimlilikle çalışabilmesidir. Bu, girdi ısısının sık devinim yaptığı bazı endüstriyel uygulamalarda ve ORC'nin buhar türbinlerine kıyasla daha uzun süre çalışabildiği Güneş-Termal uygulamalarda özellikle avantajlıdır. Zira bu tür uygulamalarda Güneş'in doğduğu sabahın erken saatlerinde çalışmaya başlayıp Güneş'in battığı akşamın geç saatlerine kadar işleyebilir (İnt. Kyn. 15).

6. Çalışma sıvısı su/buhar yerine kullanıldığından su kullanımı gerekli değildir. Ayrıca buhar sistemlerinde genellikle gerekli olan mineralsız su veya diğer yardımcı sistemlere ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla sistemin tamamının işletilmesi ve kontrolü daha kolaydır (İnt. Kyn. 15).
7. ORC' de türbin, buhar türbinine kıyasla daha düşük bir hızla döner, bu da mekanik zorlanmayı azaltır. Ayrıca, aracı olarak devir düşürücü dişli sistemi ve bağlı parçaları yoluyla doğrudan türbinle jeneratör arasında bir bağ kurulmasına imkân tanır. ORC ile yüksek türbin verimliliği (%85'e varıncaya kadar) elde edilebilir (İnt. Kyn. 15).
8. Ek olarak, çalıştırma-durdurma işlemlerinin kolaylığı, otomatik/devamlı çalıştırılabilme, güvenli ve sessiz çalıştırma, sahaya yüksek uyumluluk (%98 ve fazlası nadir değildir) ve ciddi bakımlar olmaksızın geçen uzun ömür (20+ yıl) diğer avantajları arasındadır (İnt. Kyn. 15).
9. Üretilen enerjinin düşük MW aralığında olduğu özel durumlarda ORC' nin buhar türbini karşısında özel ekonomik avantajı bulunmaktadır. Zira buhar türbini ek olarak çevresel bir sistem gerektirmekte; bu sistem maliyete eklenmekte ve bu da ekonomik anlamda küçük boyutlarda olmamaktadır (İnt. Kyn. 15).

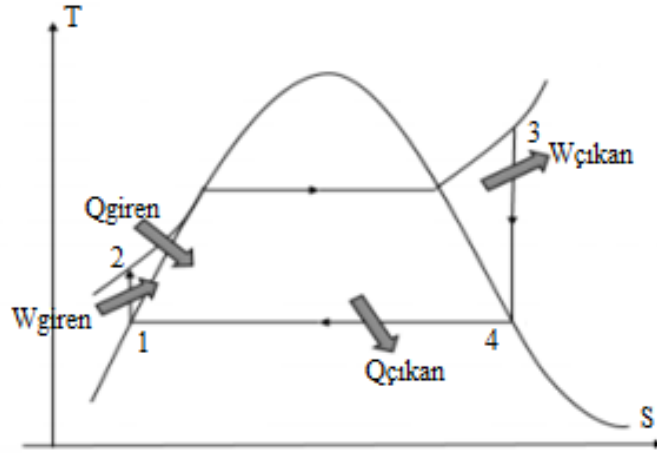
3. MATERYAL VE METOT

3.1 Organik Rankine Çevrim (ORC) Matematiksel Denklemleri



Şekil 3.1 Basit Bir ORC Yapısı Şematik Görünümü.

Organik Rankine Çevrimi dört adet ana elemanlardan oluşur. Bunlar pompa, evaporatör (buharlaştırıcı), türbin, kondenser (yoğuşturucu)'dir. Sıcak kaynak jeotermal sudur. Jeotermal su girişi 150 kg/s olarak belirlenmiştir. Çevrim 1 numaralı durumda aracı akışkanın doymuş olarak girmesiyle başlar. Buradan 2. Duruma buharlaştırıcıya girer. Aracı akışkanın buharlaşabilmesi için evaporatör jeotermal sudaki ısıdan faydalanır. Buhar türbini çalıştırır. Türbini döndürerek oluşan mekanik enerjiyi jeneratör ile elektrik enerjisine dönüştürür. 4. Durumda buhar yoğuşturucu (kondenser) yardımıyla sıvı forma getirilir. Yoğuşurma işlemi için soğutma kulesi veya yer altı suyu kullanılabilir.



Şekil 3.2 Rankine Çevrimi Sıcaklık-Entropi Grafiği.

Q_{giren} : Isıl enerji kaynağından çalışma akışkanına geçen ısı,

$Q_{cıkan}$: Çalışma akışkanından düşük sıcaklıktaki enerji kuyusuna geçen ısı,

W_{giren} : Çalışma akışkanını buharlaştırıcı basıncına sıkıştırmak için yapılan iş,

$W_{cıkan}$: Buharın türbinde genişlerken yaptığı iş.

3.1.1 Pompa Modellemesi için Matematiksel Denklem Takımı

Bu işlemde kondenserden çıkan doymuş sıvı evaporatör basıncında entropi sabit hızda pompalanır. Enerji dönüşüm verimliliği ideal süreçte bile asla %100 'e ulaşmaz. Şekil 3.1'te gösterildiği gibi, nokta 1, pompa girişindeki çalışma sıvısı durumunu gösterir ve nokta 2, pompa çıkışındaki çalışma sıvısının durumunu gösterir. Pompanın iş girişi alttaki denklem ile hesaplanır (Obafunmi 2014).

$$W_{giren} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

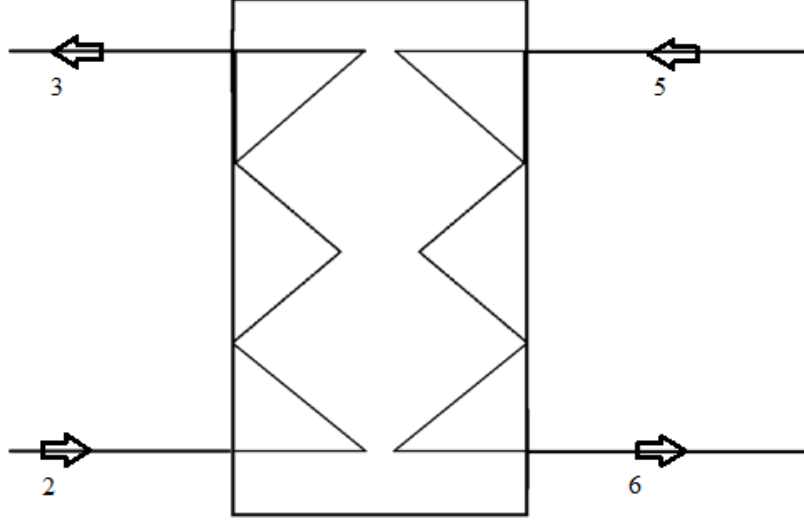
W_{giren} pompanın giriş veya harcanan gücü (kJ/kg), h_2 pompanın çıkış entalpisi (kJ/kg), h_1 pompanın giriş entalpidir (kJ/kg) (Obafunmi 2014).

3.1.2 Evaporatör (Buharlaştırıcı) için Matematiksel Denklem Takımı

3. nokta ise buharlaştırıcının çalışma sıvısına ısı eklendiğindeki durumunu gösterir. Ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$Q_{giren} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (3.2)$$

Q_{giren} ısı kaynağından akışkana geçen enerji (kJ/kg), \dot{m} akışkan debisini kg/s, h_3 buharlaştırıcının çıkışındaki buhar entalpisidir (kJ/kg) (Obafunmi 2014).



Şekil 3.3 Isı Değiştirici İç Yapısı.

Isı değiştiricideki toplam ısı transferi aşağıdaki denklemden bulunabilir (Obafunmi 2014).

$$Q_{hex} = h_3 - h_2 = h_5 - h_6 \quad (3.3)$$

Jeotermal su kuyusundan ısı değiştiriciye giriş entalpisini h_5 (kJ/kg), ısı değiştiriciden reenjeksiyon kuyusuna dönen sıvının entalpisini h_6 (kJ/kg) ifade eder.

3.1.3 Türbin Modellemesi İçin Matematiksel Denklemler Takımı

Türbinin bir diğer adı genişleticidir. Bu işlemde, çalışma sıvısı mekanik iş üretmek için türbinde genişledikçe enerji evaporatörde emilir. 4. Nokta ise türbin çıkışını gösterir. Burada üretilen iş şu şekilde hesaplanabilir:

$$W_{çıkan} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \quad (3.4)$$

$W_{çıkan}$, genişleticide üretilen mil işini (kJ/kg), \dot{m} akışkan debisini kg/s, h_4 ise genişleticiden çıkan buhar entalpisini gösterir (kJ/kg) (Obafunmi 2014).

3.1.4 Kondenser Modellemesi İçin Matematiksel Denklem Takımı

Kondenserdeki çalışma sıvısı yoğuştuğu için bu süreçte ısı reddedilir ve sistemde tekrar geri dönüştürülür. Borulardaki sürtünme kayıplarına bakılmaksızın kondenser, ısı reddi süreci olmasına rağmen kondenserdeki basınç düşüşü izobarik olduğu söylenir. Çalışma sıvısı kondenserdan ayrıldıktan sonra doymuş olur. Kondenser (yoğusturucu) çıkışındaki çalışma sıvısının durumu Nokta 1'de gösterilmiştir. Aynı zamanda pompa girişini de temsil eder (Obafunmi 2014).

$$Q_{çıkan} = m (h_4 - h_1) \quad (3.5)$$

$Q_{çıkan}$, yoğusturucudan çevreye atılan ısı miktarını (kJ/kg), m akışkan debidir (kg/s). Çevrim bir kapalı sistem içerisinde gerçekleştiğinden dolayı iç enerji değişimi sıfırdır. Bu nedenle, denklem (3.6)'de belirtildiği gibi, sistemin net işi net ısı alışverişine eşit olmaktadır. Denklem (3.7)'ye göre de net iş, genişleticiden elde edilen iş ile sistemin çalışması için gerekli işin farkına eşit olmaktadır (Çengel ve Boles 1996).

$$Q_{net,çıkan} = Q_{giren} - Q_{çıkan} \quad (3.6)$$

$$W_{net,çıkan} = W_{çıkan} - W_{giren} \quad (3.7)$$

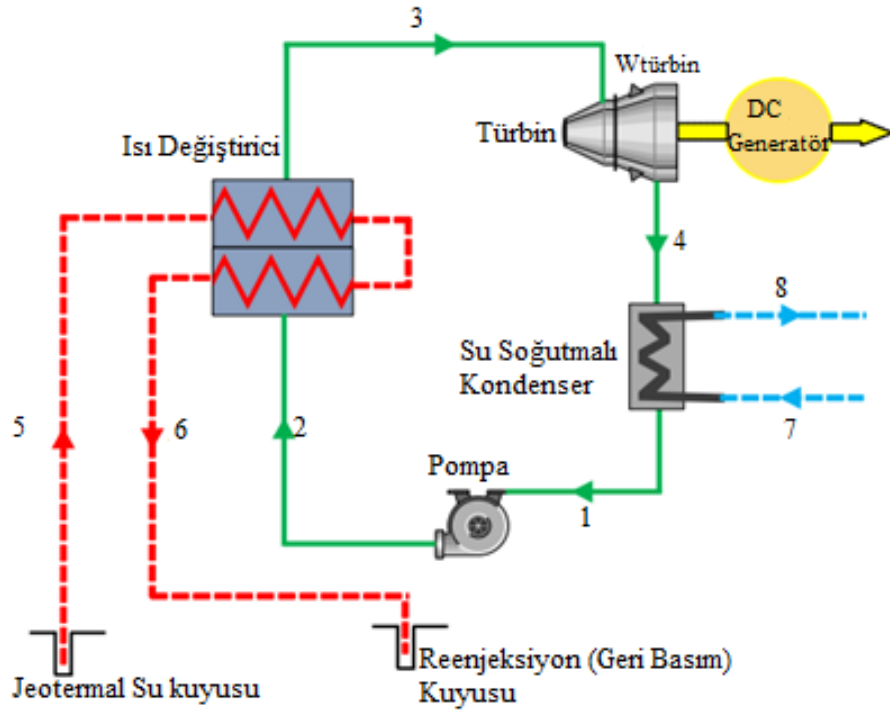
Buharlı güç sisteminin ısıl verimi, denklem (3.8)'de belirtildiği gibi, giren ısıl enerjinin net işe dönüştürülme yeteneğidir (Çengel ve Boles 1996).

$$\eta_{ısıl} = \frac{W_{net,çıkan}}{Q_{giren}} = 1 - \frac{Q_{çıkan}}{Q_{giren}} \quad (3.8)$$

Çevrim verimliliği net çıkan işin, emilen ısıya oranıdır diyebiliriz. Verimlilik çalışma sıvısının doğal yapısına bağlı değildir.

3.2 Afyon Jeotermal Elektrik Santrali Sistem Modellemesi

3.2.1 AFJES Özellikleri



Şekil 3.4 AFJES Şematik Görünümü (Yılmaz 2020).

AFJES ORC çevrimi üç bölümden oluşmaktadır bunlar; Jeotermal akışkanın döngüsü diğeri, ORC'nin iç döngüsü (R134A), üçüncü ve son döngü ise; Soğutma suyu akışkanının döngüsüdür. Soğutma suyu döngüsü jeotermal kaynak ile yüksek basınca ulaşan buhar fazındaki R134A gazının türbin çıkışında tekrar sıvıya dönüşmesi için soğutucu akışkanın doğru debi ve sıcaklıkta yoğurturucuya (condenser) sağlanması yüksek verim için şarttır (Şahin 2016).

Çizelge 3.1 R134a Gazının Termofiziksel Özellikleri (Boran vd. 2015).

Özellik	R134A
Kimyasal Gösterim	CF_3CH_2F
Mol Ağırlığı	4,2
Kaynama Noktası (°C)	-26,2
Kritik Sıcaklık (°C)	101,1
Kritik Basınç (kPa)	4067

Çizelge 3.1 (Devamı) R134a Gazının Termofiziksel Özellikleri (Boran vd. 2015).

Yoğunluk (5°C'de, kg/m ³)	S	1279
	B	17,3
Isıl İletkenlik (5°C'de, W/mK)	S	0,0971
	B	0,0126
GWP (100 yıl, CO ₂ =1)		1300
ODP		0

Çizelge 3.2 Gazların Zehirlilik Sınıflandırılması (Bilen vd. 2014).

Yanıcılık Sınıfı	Zehirlilik Sınıfı	
	Grup A	Grup B
	Düşük Zehirlilik	Yüksek Zehirlilik
3 Yüksek Yanıcılık	A-3 Metan, Propan, Bütan	B3
2 Düşük Yanıcılık	A1-HCFC-142b-HFC-152b	B2-Amonyak
1 Alevlenme Özelliği Yok	A1-CFC-11, 12,113,114,R500,502,R22,R134A	B1-HCFC-123

Düşük sıcaklıktaki binary çevrim santrallerinde çalışma sıvısı olarak kullanımı verimli olduğundan, alevlenme özelliği olmamasından ve düşük zehirlilik özellikleri nedeniyle R134A gazı kullanılmıştır.

Sıcak jeotermal su bir dizi ısı eşanjöründen geçer, burada çalışma sıvısı buharlaşır. Daha sonra buharlaştırılmış çalışma sıvısı ikili bir türbin aracılığıyla elektrik üretmek için genişletilir. Türbin genişletilmiş çalışma sıvısı daha sonra su soğutucusunda yoğunlaştırılır ve jeotermal su sıcak tarafından ısıtılmak üzere ısı eşanjörlerine geri döner. Genellikle hava soğutmalı kondenser kullanılır, fakat bu santralde su soğutmalı kondenser kullanılıyor. Bunun nedeni santral yakınında soğutma için bir nehir havzasının olmasıdır. Bu nedenle daha verimli soğutma sağlanabilir. Jeotermal su sık sık rezervuar aracılığıyla reenjeksiyon kuyusuna yeniden enjekte edilir. Jeotermal santraller ikili çevrim kullanıldığında, yoğunlaşmayan gazlar neredeyse hiç çevresel emisyon üretmezler. İkili çevrim santrallerinde jeotermal su enerjisini türbinin shaft işine dönüştüren bir ısı motorudur (Yılmaz 2020).

Çizelge 3.3 AFJES'E Ait Çalışma Verileri.

Jeotermal Su Sıcaklığı	110°C
Santral Güç Kapasitesi	2622 kW
Çalışma Sıvısı	R134A
Jeotermal Giriş Suyu Debisi	150 kg/s
Türbin İzentropik Verim	%85
Pompa İzentropik Verim	%85
Türbin Devir Hızı	1500 rpm
Frekans	50 Hz
Jeotermal Su Yoğunluğu	0,952 kg/l

AFJES' ten alınan veriler ışığında, jeotermal suyun sıcaklığı 110 °C'dir. Mevsimsel farklılıklara göre değişken olsa da ortalama değeri baz alınmıştır. 150 kg/s debiye sahip jeotermal su buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcıdan geri reenjeksiyon kuyusuna dönen suyun sıcaklığı yaklaşık 70 °C'dir. Buharlaştırıcıdan türbine giren buhar ve R134A gazı birleşimi 100 °C de ve 2800 kPa da girer ve 500 kPa olarak çıkar. AFJES veri kullanım izni Ek-1'de yer almaktadır.

3.2.2 AFJES'in EES Programında Modellemesi

Mühendislik Denklem Çözücü (EES), lineer olmayan eşzamanlı denklem sistemlerinin çözümü için kullanılan ticari bir yazılım paketidir. Termodinamik ve ısı transferi problemlerinin çözümü için birçok kullanışlı özel fonksiyon ve denklem sağlar bu da onu bu alanlarda çalışan makine mühendisleri için kullanışlı ve yaygın olarak kullanılan bir program haline getirir. EES, belirtilen termodinamik özelliklerde özellikleri çağıran kodun kullanımı yoluyla elle yinelemeli problem çözmeyi ortadan kaldıran termodinamik özellikleri saklar. EES, yerleşik işlevleriyle termodinamik özelliklerin elde edilmesi gibi sıkıcı ve zaman alıcı görevi ortadan kaldırarak yinelemeli çözümü gerçekleştirir (İnt. Kyn. 16).

EES ayrıca, kullanıcının aynı anda birkaç değişkeni karşılaştırmasını sağlayan parametrik tablolar içerir. Parametrik tablolar ayrıca grafikler oluşturmak için kullanılabilir. EES, hem koda hem de tablolarda komut olarak entegre edilebilir. EES ayrıca, bir dizi başka değişkeni değiştirerek seçilen bir değişkeni en aza indiren veya en üst düzeye çıkaran

optimizasyon araçları sağlar. Kodda bir çağrı ile erişilebilen bilgileri depolamak için arama tabloları oluşturulabilir. EES kodu, kullanıcının denklemleri herhangi bir sırayla girmesine ve bir çözüm elde etmesine izin verir, ancak aynı zamanda if-then-else ifadeleri oluşturmak için iç içe yerleştirilebilen if-then ifadeleri de içerebilir. Kullanıcılar, kodlarında kullanmak üzere işlevleri ve ayrıca birden çok çıktıya sahip işlevler olan prosedürleri yazabilirler (İnt. Kyn. 16).

Tercihlerin ayarlanması, kullanıcının bir birim sistemi seçmesine, yineleme sayısı dahil durdurma kriterlerini belirlemesine ve ayrıca diğer seçeneklerin yanı sıra birim denetimi ve birimleri önermeyi etkinleştirmesine/devre dışı bırakmasına olanak tanır. Kullanıcılar ayrıca yinelemeli çözüm sürecine yardımcı olmak ve EES'nin hızlı ve başarılı bir çözüm bulmasına yardımcı olmak için tahmin değerleri ve değişken limitler belirleyebilir (İnt. Kyn. 16).

Jeotermal santrale ait sıcaklık ve debi değerlerine bağlı olarak entalpi değerlerinin hesaplanabilmesi için EES programı kullanılmıştır.

3.2.2.1 EES (Engineering Equation Solver) Programındaki Sonuçlar

Aşağıdaki çizelgede 10 birim zamanda T_0 ölü hal sıcaklığı, T_{geo} jeotermal su sıcaklığı, M_{geo} suyun debisini, h_1 pompanın giriş entalpisi, h_2 pompanın çıkış entalpisi, h_3 ısı değiştirici çıkış entalpisi, h_4 türbin çıkış (kondenser giriş) entalpisi, h_5 jeotermal suyun ısı değiştiriciye giriş entalpisi, h_6 ise ısı değiştiriciden reenjeksiyon kuyusuna geri dönen sıvının entalpisini gösterir.

Çizelge 3.4 EES Programında Sıcaklık, Debi ve Entalpi Değişim Sonuçları.

	T_0 (°C)	T_{geo} (°C)	M_{geo} (kg/s)	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_3 (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)
R1	0	100	100	73,33	75,51	293,6	264,1	419,2	321,4
R10	3,182	101,8	104,5	73,33	75,51	296,6	266,6	426,8	315,7
R20	6,717	103,8	109,6	73,33	75,51	299,8	269,2	435,4	309,8
R30	10,25	105,9	114,6	73,33	75,51	302,9	271,8	443,9	304,1
R40	13,79	107,9	119,7	73,33	75,51	306	274,3	452,4	298,6
R50	17,32	109,9	124,7	73,33	75,51	308,9	276,8	461	293,3
R60	20,86	111,9	129,8	73,33	75,51	311,8	279,2	469,5	288,3
R70	24,39	113,9	134,8	73,33	75,51	314,6	281,6	478,1	283,4
R80	27,93	116	139,9	73,33	75,51	317,4	283,9	486,7	278,7
R90	31,46	118	144,9	73,33	75,51	320,1	286,2	495,2	274,2
R100	35	120	150	73,33	75,51	322,9	288,5	503,8	269,8

Çizelge detaylı incelendiğinde, ölü hal sıcaklığı T_0 değişimi 0°C - 35°C jeotermal su sıcaklığının T_{geo} 100°C - 120°C , jeotermal su debisinin 100 kg/s - 150 kg/s arasında değişimi gözlemlenmiştir. Döngü boyunca pompa giriş h_1 ve pompa çıkış h_2 entalpileri sabittir.

h_3 ısı değiştirici çıkış entalpisi $293,6\text{ kJ/kg}$ - $322,9\text{ kJ/kg}$ arasında, h_4 türbin çıkış entalpisi $264,1\text{ kJ/kg}$ - $288,5\text{ kJ/kg}$, h_5 jeotermal sıvının ısı değiştiriciye giriş entalpisi $419,2$ - $503,8$ arasında artmıştır. Yalnızca ısı değiştiriciden reenjeksiyon kuyusuna geri dönüş suyun entalpisi h_6 azalmıştır.

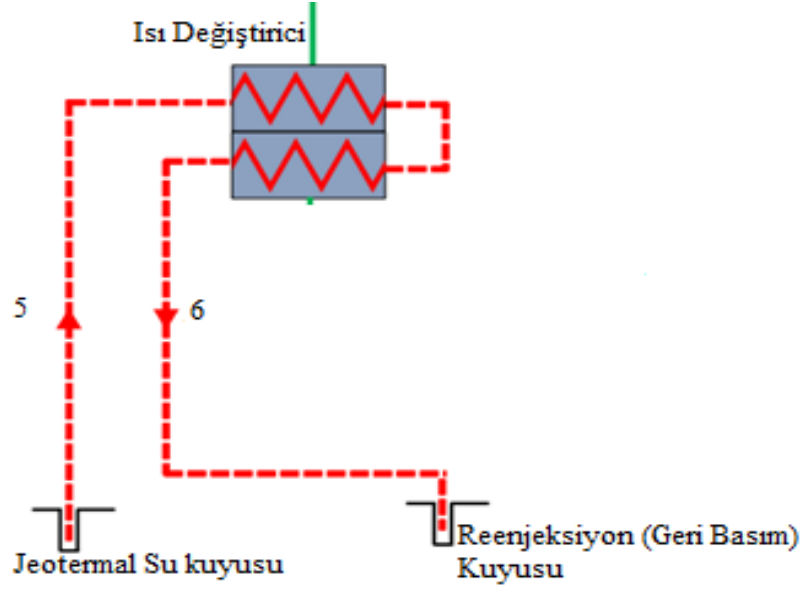
3.2.3 AFJES Sisteminin Matlab/Simulink Programında Modellenmesi

MATLAB (matrix laboratory), çok paradigmatlı sayısal hesaplama yazılımı ve dördüncü nesil programlama dilidir. Sahipli bir programlama dili olan MATLAB, MathWorks tarafından geliştirilmektedir. MATLAB kullanıcıya, matris işleme, fonksiyon ve veri çizme, algoritma uygulama, kullanıcı arayüzü oluşturma, C, C++, Java ve Fortran gibi diğer dillerde yazılmış programlarla ara bağlama imkânı tanır. MATLAB kullanıcıları mühendislik, bilim ve ekonomi gibi çeşitli alanlardan gelmektedir. MATLAB, yaygın olarak akademik ve araştırma kurumlarında olduğu kadar endüstriyel işletmelerde de çok kullanılmaktadır (İnt. Kyn. 17).

Simulink, Matlab arayüzü ile entegredir. Datalar arasında kolay bir şekilde geçiş yapılır. Dinamik yapılar ve gömülü sistemleri tasarlamak, simüle etmek, bloklar ile kod oluşturmak, test ve analiz etmeye yarayan grafik programlama ortamıdır. Simulink programında blok şemalar sürükleyip bırak mantığı ile çalışır. Geniş bir kütüphaneye sahiptir. Görselliği ön planda olan program olmasından dolayı kod yazmadan sistem modellemesi rahatça yapılabilir ve zaman tasarrufu sağlar.

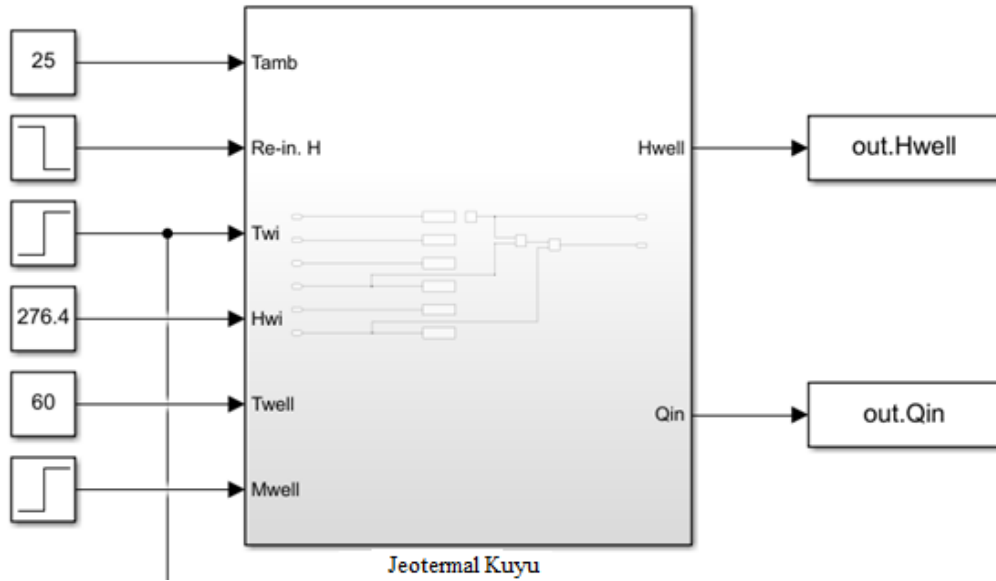
3.2.3.1 Jeotermal Kuyu Blok Diyagramı

Matlab /Simulink programında tasarımı yapılan jeotermal elektrik üretim sistemi beş ana alt sistemden oluşmaktadır. Bunlardan ilki jeotermal kuyu kısmıdır. Su kuyusu ve reenjeksiyon kuyusuna ait değerler tek bir alt sistemde modellenmiştir.



Şekil 3.5 Jeotermal Kuyu Şematik Görünümü.

Şekil 3.5’te jeotermal su kuyusu ve reenjeksiyon kuyusunun basit şekli gösterilmiştir. Su kuyusu suyun ilk çıktığı yerdir. Reenjeksiyon kuyusu, enerjisinin bir kısmı alınmış olan sıvının çevreyi kirletmemesi ve su rezervuarının beslenebilmesi için alıcı ortama geri döndüğü yerdir. Bu sistem sayesinde enerjinin sürdürülebilir hale gelmiştir. Buradan hareketle oluşturulan alt sistemde, sıcaklık ve suyun debisine bağlı olarak değişen entalpi değerleri, EES programından alınan sonuçlar ışığında değerler girilmiştir.



Şekil 3.6 Jeotermal Kuyu Blok Diyagramı.

Jeotermal kuyu giriş ve çıkış parametreleri olmak üzere iki ana bölümde incelenebilir.

Çizelge 3.5 Jeotermal Kuyu Giriş Parametreleri ve Değerleri.

Jeotermal Kuyu Giriş Parametreleri	
Ortam Sıcaklığı (T_{amb})	25°C
Reenjeksiyon Kuyu Entalpisi (Re-in (h_6))	321,4 – 269,8 kJ/kg
Jeotermal Suyun Sıcaklığı (T_{wi})	100°C-120°C
Suyun Ölü Hal Entalpisi (h_{wi})	276,4 kJ/kg
Reenjeksiyon Kuyusuna Dönen Sıvının Sıcaklığı (T_{well})	60°C
Jeotermal Suyun Isı Değiştirici Öncesi (M_{well})	100-150 kg/s

T_{amb} ortam sıcaklığı olmak üzere Re-in h (reenjeksiyon kuyusu entalpisi (h_6)), T_{wi} jeotermal suyun sıcaklık değeri, h_{wi} suyun ölü hal durumunun entalpisi, T_{well} reenjeksiyon kuyusuna dönen sıvının ortalama sıcaklık değeri, M_{well} ise jeotermal suyun ısı değiştiriciye girmeden önceki debisidir.

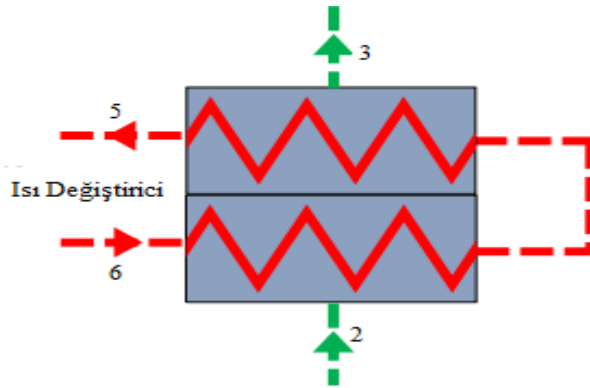
Jeotermal suyun sıcaklığından faydalandıktan sonra reenjeksiyon kuyusuna geri dönen suyun entalpisinin, sıcaklığının, debisinin azaldığı görülmüştür.

Q_{in} hesaplamak için ise aşağıdaki formül kullanılmıştır. Q_{in} jeotermal suyun kuyuda sahip olduğu enerji kapasitesidir. Birimi kW'tır.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} \cdot (h_5 - h_0) \quad (3.9)$$

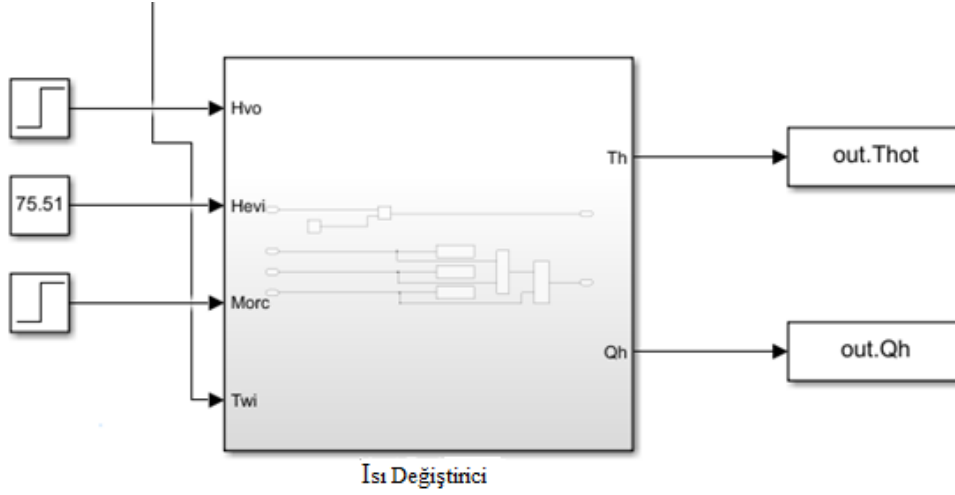
3.2.3.2 Isı Değiştirici Blok Diyagramı

Alt sistemlerden ikincisi ise ısı değiştiricinin bulunduğu kısımdır. Üretim kuyusundan gelen 100°C-120°C'deki jeotermal akışkan, buharlaştırıcı olarak kullanılan ısı değiştiricisine girer. Ardından enerjisini, daha düşük sıcaklıklarda buhar fazında organik akışkan olan R134A gazına aktarır.



Şekil 3.7 Isı Değiştirici Şematik Görünüm.

Şekil 3.7’de ısı değiştiricinin şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Isı Değiştirici Ünitesi Blok Diyagramı.

Çizelge 3.6 Isı Değiştirici Giriş Parametreleri ve Değerleri.

Isı Değiştirici Giriş Parametreleri	
Isı Değiştirici Çıkış Entalpisi (h_{vo})	293,6- 322,9 kJ/kg
Pompa Çıkış Entalpisi (h_{evi})	75,51 kJ/kg
Rankine Çevrim İçindeki Suyun Debisi (M_{orc})	44,82-141,8 kg/s
Jeotermal Suyun Sıcaklığı (T_{wi})	100°C-120°C

h_{vo} ısı değiştirici çıkışındaki buharın entalpisi olmak üzere, h_{evi} pompanın ısı değiştiriciye giriş entalpisidir. h_{vo} birim zamanda 293,6-322,9 (kJ/kg) arasında artarak devam ederken, h_{evi} sabittir. Burada artık organik döngüsündeki suyun debisinden (M_{orc}) bahsedebiliriz. Isı değiştiricisiyle birlikte Organik Rankine Çevrim kapalı döngüsü içerisinde su- buhar fazındaki jeotermal sıvı giriş yapar. M_{orc} , yani organik çevrim içindeki sıvının debisi 44,82-141,8 kg/s arasında değişir. Değerini sabit tutmak istersek, Afyon Jeotermal Elektrik Santrali için bu değer ortalama 137,5'tur.

Kullanılan kodlar:

$$Q_h = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (3.10)$$

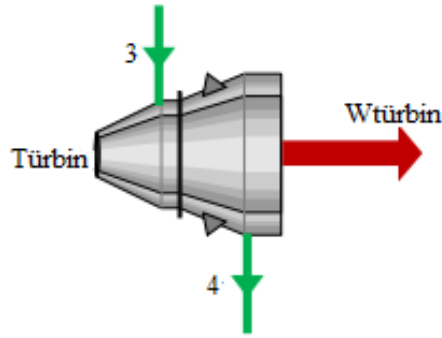
Q_h ısı değiştiriciden geçen enerji (kJ/kg), \dot{m} akışkan debisini kg/s, h_3 (h_{vo}) buharlaştırıcının çıkışındaki buhar entalpisidir (kJ/kg), h_2 (h_{evi}) pompadan ısı değiştiriciye giriş entalpisidir. (kJ/kg).

$$T_{hot} = T_{wi} - 10 \quad (3.11)$$

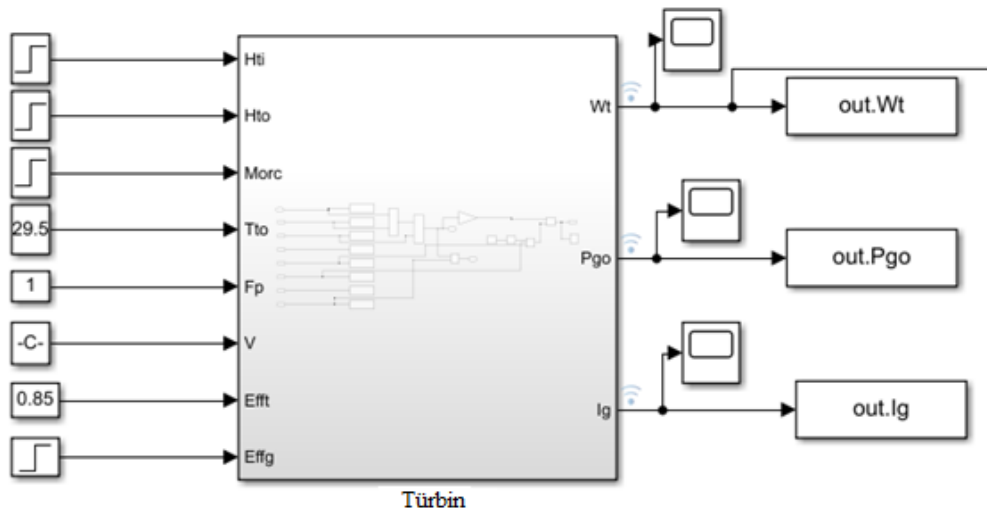
Isı değiştiricideki sıvının sıcaklık değeri T_{hot} bulabilmek için yukarıdaki formül kullanılmıştır (Jeotermal suyun sıcaklık değeri (T_{wi})).

3.2.3.3 Türbin Blok Diyagramı

Alt sistemlerden üçüncüsü ise türbinin olduğu bloktur. ORC sistemin en önemli bileşenidir. Santralin performansını belirler. Elektrik enerjisi üreten jeneratörlere, mekanik enerjili organik akışkanı genişleterek iletir. Ayrıca genişletilen akışkanı, yoğuşturma işlemine tabi tutmak için kondensere gönderir. Bu şekilde ORC döngüsüne katkıda bulunur.



şekil 3.9 Türbinin şematik Görünümü.



şekil 3.10 Isı Değiştirici Ünitesi Blok Diyagramı.

Çizelge 3.7 Türbin Giriş Parametreleri ve Değerleri.

Türbin Giriş Parametreleri	
Türbin Giriş Entalpisi (h_{ti})	293,6- 322,9 kJ/kg
Türbin Çıkış Entalpisi (h_{to})	264,1-288,5 kJ/kg
Rankine Çevrim İçindeki Suyun Debisi (M_{orc})	44,82-141,8 kg/s
Türbin Çıkış Sıcaklığı (T_{to})	29,5 °C
Güç Faktörü (FP (Cos ϕ))	1
Türbin Verimliliği (Eff_t)	0,85
Jeneratör Giriş Parametreleri	
Jeneratör Çalışma Gerilimi (V)	6000 V
Jeneratör Verimliliği (Eff_g)	0,85

Yukarıdaki çizelgede, türbin ve jeneratöre ait bazı giriş parametreleri yer almaktadır. h_{ti} türbin giriş entalpisidir. h_{vo} , yani ısı değiştirici çıkış entalpisi ile değerdedir (293,6-322,9). h_{to} türbinden çıkan su buhar fazındaki jeotermal sıvının kondensere giriş entalpisidir ve 264,1-288,5 değerleri arasında değişir. T_{to} , AFJES için ortalama türbinden geçen akışkanın sıcaklığıdır. Eff_t , türbin verimliliğidir. AFJES'ten alınan veriler ışığında jeneratör için çalışma gerilimi 6000V, cos ϕ güç faktörü değeri 1, jeneratör verimlilik değeri 0,85tir. Güç faktörü değeri aktif güç ile görünür güç arasındaki faz açısını gösterir.

Kullanılan kodlar:

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \quad (3.12)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (3.13)$$

W_t , türbin çıkış gücünü (kW), m akışkan debisini (orc) kg/s, h_4 ise türbinden çıkan buhar entalpisini gösterir (kJ/kg).

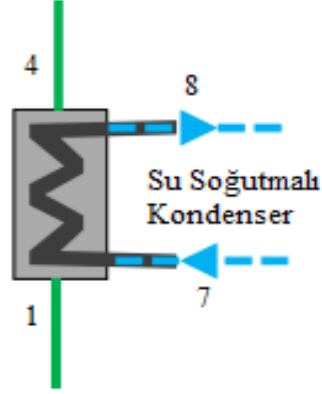
$$P_{go} = W_t * Eff_g \text{ (kW)} \quad (3.14)$$

$$I_g = 1000 * W_{net} / \sqrt{3} * V * FP \text{ (A)} \quad (3.15)$$

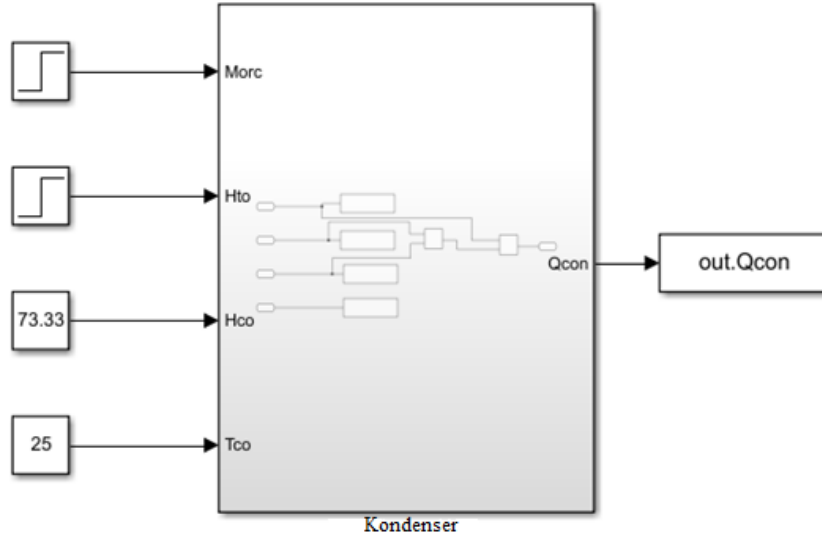
P_{go} jeneratör çıkış gücünü, W_t türbin çıkış gücü ile jeneratör verimlilik değerinin çarpılması ile bulunur. I_g ise jeneratörden geçen akım ifadesidir ve yukarıdaki formül blok şemalar ile gösterilerek I_g ve P_{go} hesaplanmıştır.

3.2.3.4 Kondenser Blok Diyagramı

Alt sistemlerden dördüncüsü ise kondenser ünitesidir. Kondenser, türbinden gelen buhar fazlı jeotermal akışkanı yoğuşturur. ORC sistem döngüsünde olan ısının dışarı atılmasını sağlar. Bu dışarı atım işlemini soğutma suyu kulesi ile gerçekleştirir. AFJES'te su soğutmalı kondenser kullanılmaktadır.



Şekil 3.11 Kondenser Şematik Görünümü.



Şekil 3.12 Kondenser Ünitesi Blok Diyagramı.

Çizelge 3.8 Kondenser Giriş Parametreleri ve Değerleri.

Kondenser Giriş Parametreleri	
Kondenser Çıkış Entalpisi (h_{co})	73,33 kJ/kg
Kondenser Giriş Entalpisi (h_{to})	264,1-288,5 kJ/kg
Rankine Çevrim İçindeki Suyun Debisi (M_{orc})	44,82-141,8 kg/s
Kondenser Çıkış Sıcaklığı (T_{co})	25°C

h_{to} türbinin çıkış entalpisidir ve aynı zamanda kondenser giriş entalpisidir. h_{co} kondenser çıkış entalpisi olup sabittir. Kondensere ait ortalama sıcaklık değeri ise 25°C'dir ($h_4 = h_{to}$, $h_1 = h_{co}$).

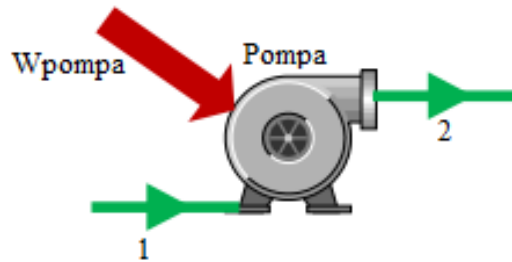
Kullanılan kodlar:

$$Q_{con} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) \quad (3.16)$$

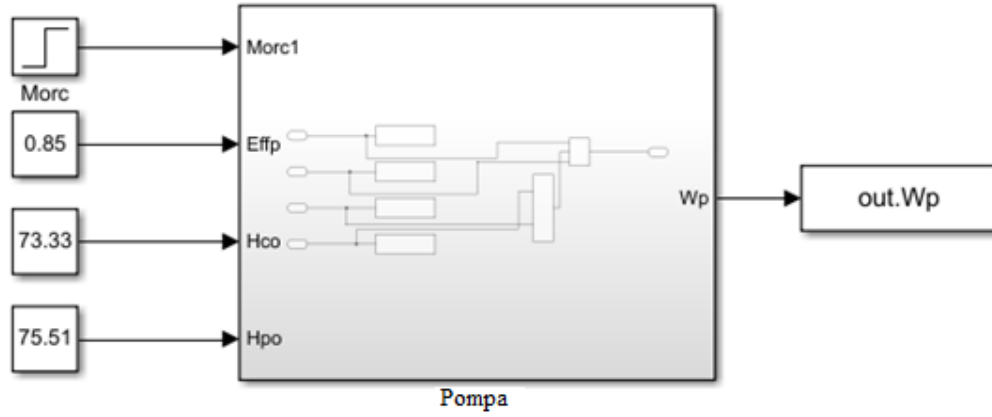
Q_{con} yoğuşturucudan, sistem dışına aktarılan ısı miktarını gösterir.

3.2.3.5 Pompa Blok Diyagramı

Alt sistemlerden sonuncu pompadır. Kondenserden gelen doymuş sıvıyı ısı değiştiriciye basar. Pompa girişindeki entalpi ne ise çıkışında da aynıdır. ORC döngüsünde iletim görevini görür.



Şekil 3.13 Pompa Şematik Görünümü.



Şekil 3.14 Pompa Ünitesi Blok Diyagramı.

Çizelge 3.9 Pompa Giriş Parametreleri ve Değerleri.

Pompa Giriş Parametreleri	
Pompa Giriş Entalpisi (h_{co})	73,33 kJ/kg
Pompa Çıkış Entalpisi (h_{po})	75,51 kJ/kg
Rankine Çevrim İçindeki Suyun Debisi (M_{orc})	44,82-141,8 kg/s
Pompa Verimliliği (Eff_p)	0,85

h_{po} pompanın çıkış entalpisi, h_{co} pompanın giriş entalpisidir. Sıcaklık ve debi değişikliğine rağmen pompanın entalpisi sabittir ($h_{po}=h_2$, $h_{co}=h_1$).

Kullanılan kodlar:

$$\dot{W}_p = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \cdot Eff_p \quad (3.17)$$

3.2.4 Modellemesi Yapılan Santralin Şebekeye Entegre Edilmesi

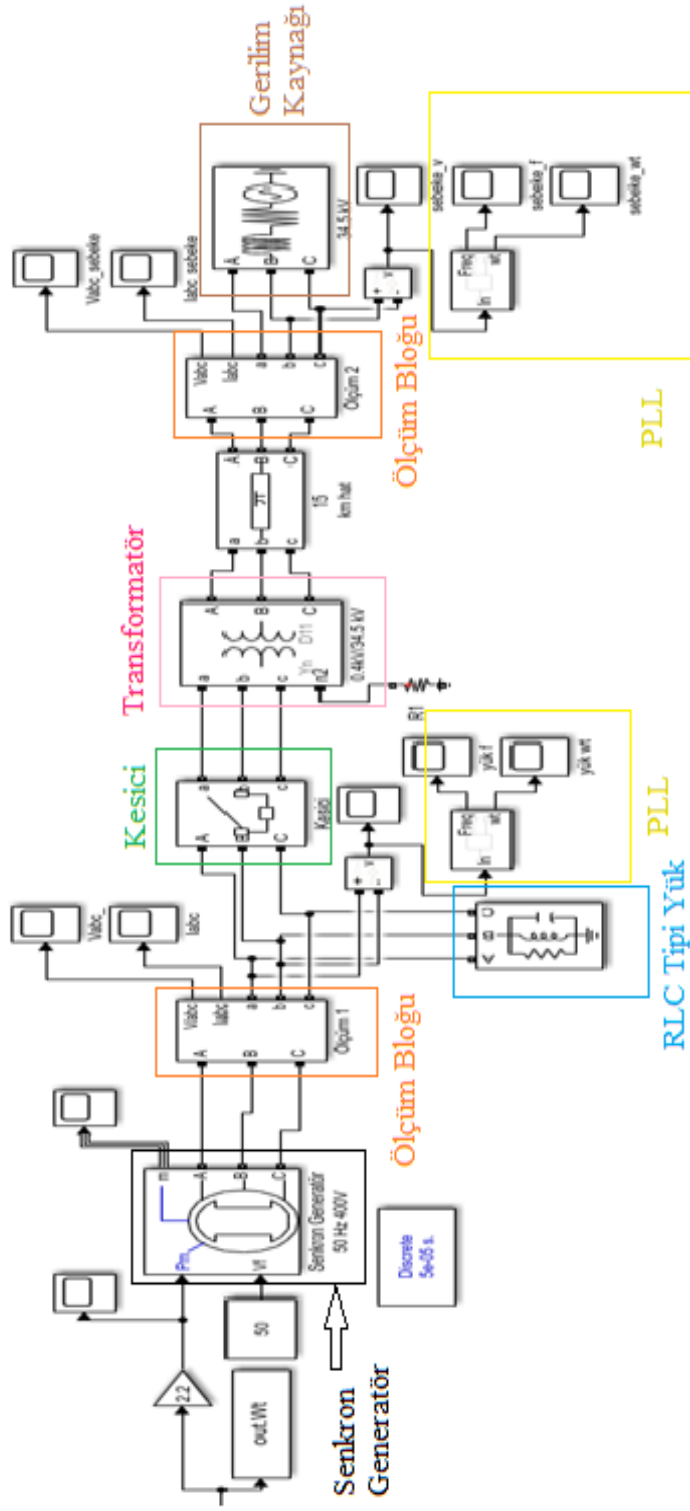
Bu bölümde modellemesi yapılan Jeotermal ORC Sisteminin şebekeye entegre edilmesi gösterilmiştir. Simülasyonda şebeke ile jeotermal santralin birlikte çalışma süreçleri ele alınmıştır. Şebekede var olan elemanların modellenmesi tek tek ele alınmıştır. Yer alan elemanların parametreleri açıklanmıştır.

Şebeke kısmında kullanılan elemanlar:

- Senkron Jeneratör
- Üç Fazlı Akım Gerilim Ölçüm Bloğu

- Yük
- Breaker (kesici)
- Voltmetre
- PLL (Faz Kilitli Döngü Bloğu)
- 0.4.kV/34.5kV transformatör
- II tipi hat
- 3 faz 34.5 kV kaynak

Ŗebekede kullanılan elemanlar ve parametreleri ile ilgili bilgiler detaylı olarak incelenmiŖtir.



Şekil 3.15 Matlab/Simulink'te Kullanılan Şebeke Blok Diyagramı.

3.2.4.1 Senkron Jeneratör Modellenmesi

Sistemde çıkıntılı kutup senkron jeneratör kullanılmıştır. Çıkıntılı kutup senkron jeneratör daha çok düşük devir hızı gerektiren dizel, su, buhar türbinlerinde kullanılır. Türbinden gelen mekanik enerjiyi mili vasıtasıyla alır ve bir fazlı veya üç fazlı gerilim üretir. Alternatör olarak da isimlendirilir. Alternatif akım (AC) bu jeneratörler ile üretilir. Türbine seri olarak bağlanmış çıkıntılı kutuplu senkron jeneratörün dakikadaki devir sayısı aşağıdaki formül ile bulunmuştur.

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (3.18)$$

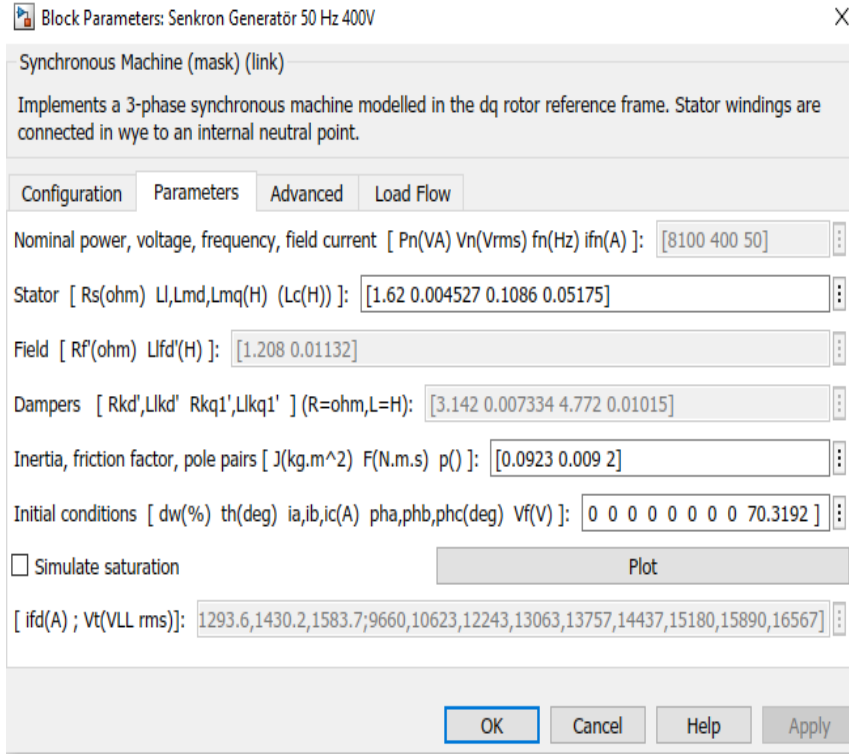
N_s : Senkron hız (döner manyetik alanın hızı), d/dk

f : Frekans (stator akımlarındaki), Hz

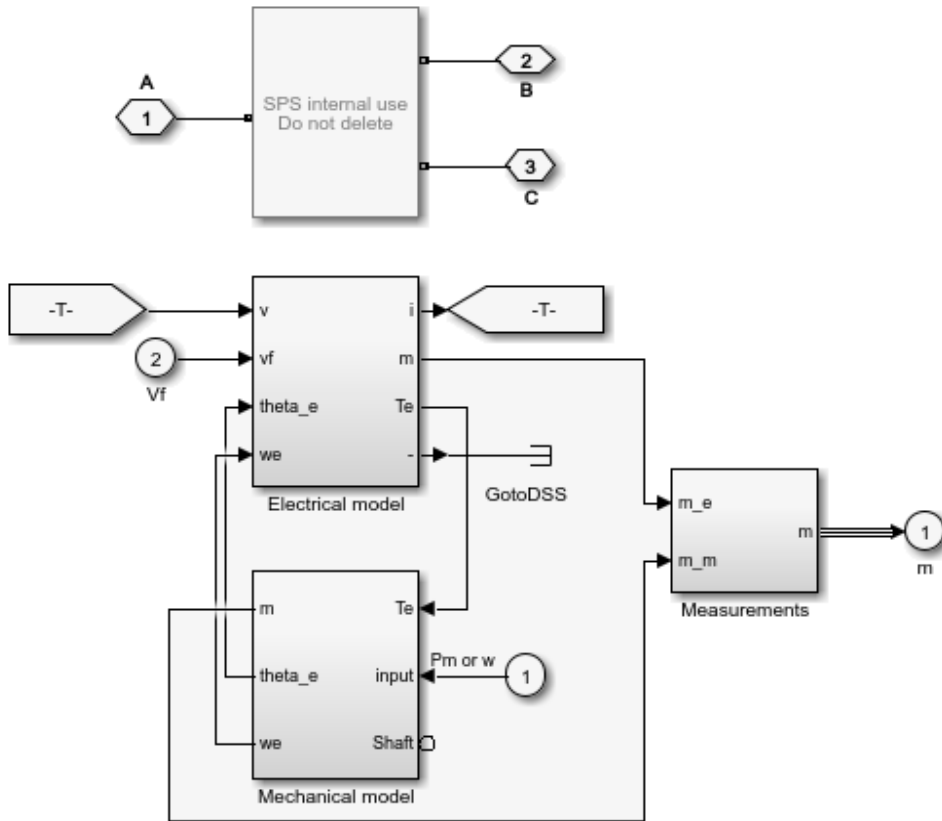
P : Kutup sayısı

Kullanılan senkron jeneratör dört kutuplu 50 Hz (Türkiye’de şebeke frekansı) frekansında çalışan ve statorda meydana gelen kutupların dönüş hızı ise 1500 d/dk’dır.

Şekil 3.15’te modellenmesi yapılan jeneratör için uyarım gerilimi 50 V kullanılmıştır. Ayrıca türbinden gelen 1322.2 kV-4877.9 kV arasında değişen mekanik enerjiyi elektrik enerjine dönüştürür. Aşağıdaki şekilde senkron jeneratöre ait parametreler ve bu parametrelerin değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Senkron Jeneratöre Ait Parametreler ve Değerleri.



Şekil 3.18 Senkron Jeneratör Blok Alt Sisteminin Simulink'te Modellenmesi.

3.2.4.2 Yükün Modellenmesi

Şebekeye entegre edilen jeotermal elektrik üretim sisteminde RLC tipi yük kullanılmıştır. Jeotermal sistem ile şebeke arasına konumlandırılan yükün breaker (kesici) yardımıyla bağlantısı yapılmıştır. RLC tipi yük 2 kW aktif, 500 Var endüktif, 500Var kapasitif güce, 400 V genliğe ve 50 Hz frekansa sahiptir. Simulasyonda PLL vasıtasıyla yük üzerindeki frekans ve güç değeri, ölçüm bloğu ile gerilim ve akım değerleri incelenmiştir.

3.2.4.3 Kesicinin Modellenmesi

Jeotermal elektrik üretim sisteminin şebekeye bağlantısı için orta noktaya üç fazlı breaker (kesici) kullanılmıştır. Sistemin senkronize olması $t=0.5$ 'inci saniyeden itibaren gerçekleşmektedir. Belirtilen saniyeden itibaren jeotermal üretim sistemi gerilimi, frekansı ile şebeke gerilimi ve frekansı birbirleri ile aynıdır. Simulasyonda modellenen breaker Şekil 3.15'te yeşil renk ile gösterilmektedir.

Şebekeler üzerindeki kesicilerin asıl kullanım amacı, röleler vasıtasıyla tespit edilen arıza olduğunda şebeke ile sistemin bağlantısını keser. Arıza durumunda sistem özellikle yüksek gerilim şebekelerinde daha büyük zararlar ortaya çıkarabilir. Devre üzerindeki elemanların zarar görmemesi, kullanım ömrünün uzaması ve çevreye zarar vermemesi (yangın vb.) amacıyla şebekelerde önemli yere sahiptir.

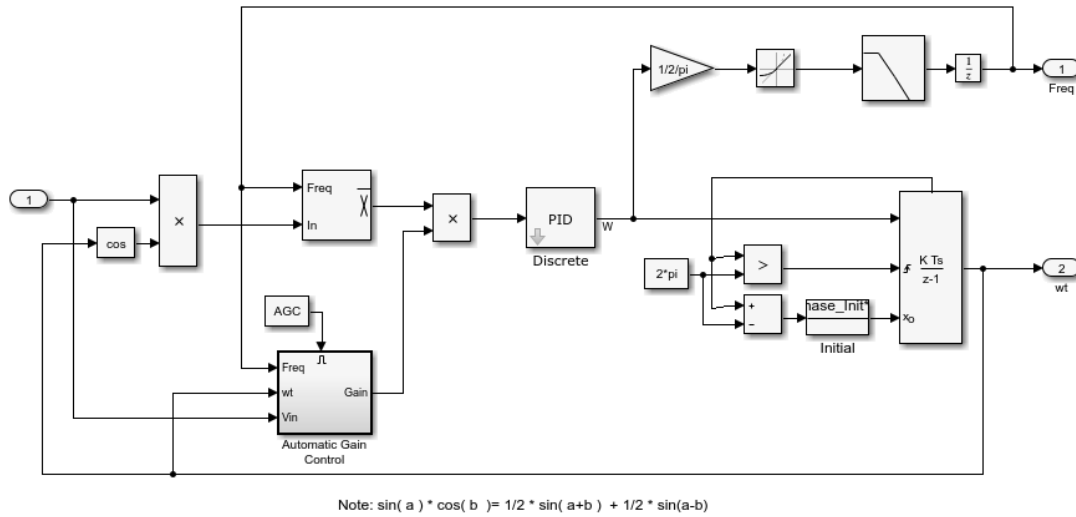
3.2.4.4 PLL Modellenmesi

PLL (Phase Locked Loops) yani faz kilitlemeli döngü giriş sinyali yardımıyla faz ve frekansı senkronize olmuş çıkış sinyalini üretmek için kullanılan bir geri beslemeli sistemdir. Kısaca değişken frekanslı sinüsoidal bir sinyali senkronize etmek için kullanılır. Otomatik kazanç değeri aktif hale getirildiğinde, PLL girişi, referans sinüsoidal girişine göre ölçeklenir. Şekil 3.15'te Simulink' te modellenen faz kilitlemeli döngü blok diyagramı yer almaktadır.

Temel bir faz kilitlemeli döngü yapısı; faz detektörü, döngü filtresi (alçak geçirgen filtre), işlemsel kuvvetlendirici ve gerilim kontrollü osilatörden (VCO) oluşmaktadır. Faz

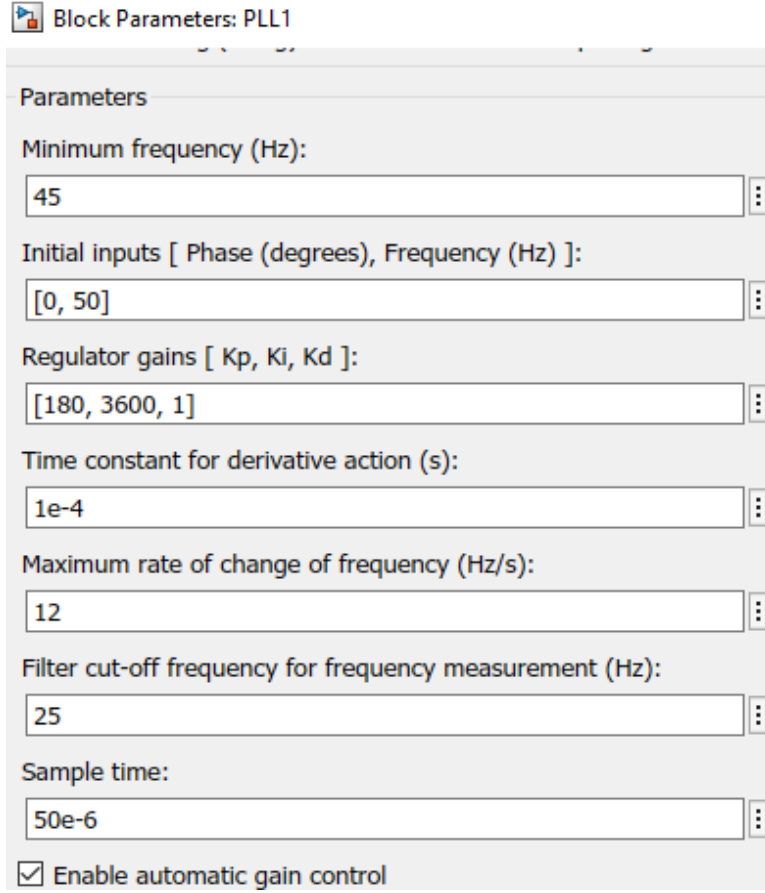
detektörü, giriş sinyali ile VCO sinyalinin fazını karşılaştırıp, çıkışında ise bu iki sinyal arasındaki faz farkıyla orantılı bir DA gerilimi oluşturur. Alçak geçiren filtre, faz kilitlemeli döngünün dinamik karakteristiğini belirler. Bu filtre döngünün hangi frekans değerlerinde çalışacağı ve faz kilitlemesi yapacağını ayarlar. Ayrıca döngünün giriş frekansı değişimlerine ne kadar hızla cevap vereceğini de belirler. İşlemsel kuvvetlendirici ise VCO ve giriş frekansı arasındaki faz farkından dolayı oluşan DA ofset gerilimini yükseltir. Kuvvetlendirici, faz kilitlemeli döngünün hassasiyetini de artırır. VCO da çıkış frekansı DA gerilimle kontrol edilen bir osilatördür (Demirdelen vd. 2013).

Modelde kullanılan faz kilitlemeli döngü blok alt yapısı şekilde gösterilmektedir. Ayrık zamanlı VCO kullanılmış olup PID kontrol ünitesi alt sistem içerisinde mevcuttur. Bu sayede ayrık zamanlı sinyaller üretir ve referans alınan giriş sinyalin genlik değişimine bağlı olarak frekans değişimlerini gösterir.



Şekil 3.19 PLL Blok Alt Sistemi Simulink'te Modellenmesi.

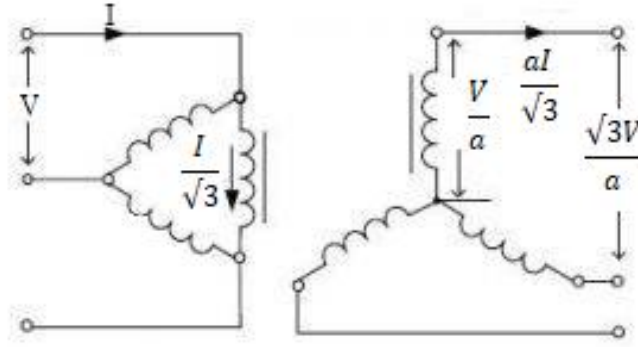
Şekilde 3.20'de Matlab/Simulink programında modellenmesi yapılan jeotermal elektrik üretim sistemindeki frekans değişimlerinin gözlemlenebilmesi için kullanılan PLL bloğuna ait parametreler ve bu parametrelere ait değerler gösterilmiştir. İki adet PLL bloğu kullanılmıştır. Bunlardan birincisi RLC tip yüke, ikincisi ise 34.5 kV kaynak uçlarına bağlanmıştır. Faz açısı 0° olarak, frekansı ise 50 Hz olarak belirlenmiştir. Regülatör Kazanç değerleri sırasıyla 180, 3600 ve 1'dir. Örnekleme zamanı ayrık zamanlı osilatör ile aynı değerde ayarlanıp senkronize edilmiştir.



Şekil 3.20 Şebekede Kullanılan PLL Parametreleri.

3.2.4.5 0.4 kV/34.5 kV Trafo Modellenmesi

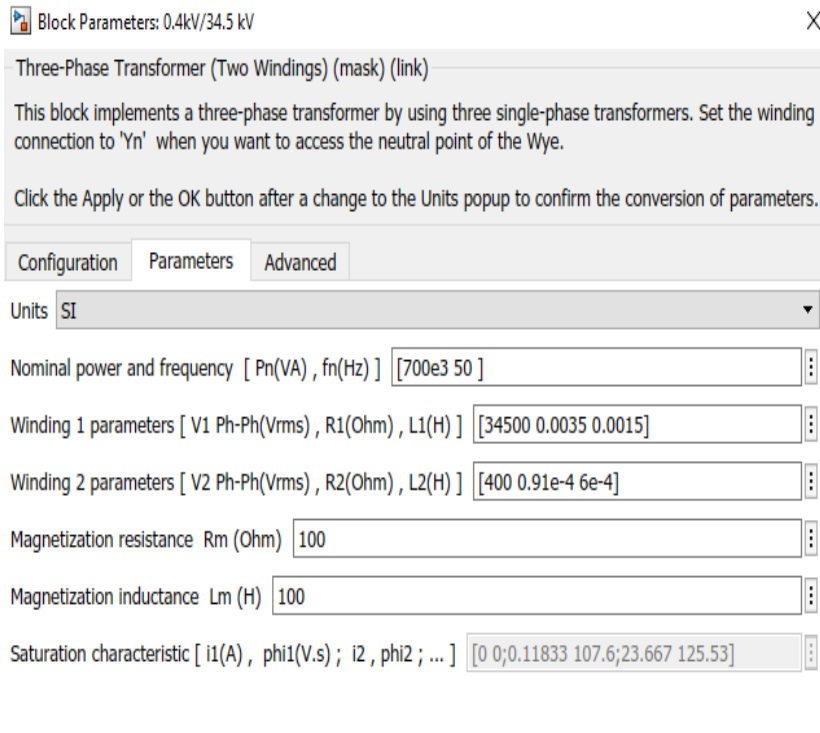
Sistemde kesicinin uç kısmına şebeke ile senkronize çalışabilmesi için 0.4kV/34.5 kV değerinde primer kısmı üçgen, sekonder kısmı yıldız bağlı transformatör eklenmiştir. Trafonun primer gerilimi 34.5 kV, sekonder gerilimi ise 0.4 kV'dir. Şekil 3.15'te trafo bloğu belirtilmiştir. Üç fazlı transformatörler arasında en çok kullanılan tiplerden biridir. Üçgen sargıda, faz-faz gerilimi yıldız sargıyla denk olabilmesi için daha fazla spir sayısı gerektirir. Bu da beraberinde yalıtım için harcanan maliyetin daha fazla olacağı anlamı taşır. Dolayısıyla, yüksek gerilim gerektiren şebekelerde bu tip trafoların kullanımından uzak durulmalıdır.



Şekil 3.21 Üç Fazlı Üçgen- Yıldız Bağlantılı Trafo (İnt. Kyn. 18).

Üçgen sargının yıldız sargıya göre faz gerilimi oranı a , hat gerilim oranı $\sqrt{3}/a$ 'dır.

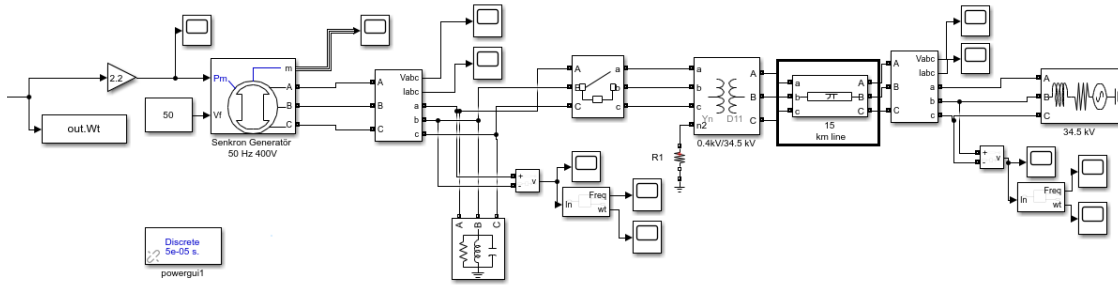
Şekil 3.22'de modellenmesi yapılan jeotermal elektrik üretim sisteminin şebekeye entegre edilmesinde kullanılan trafoya ait parametreler ve bu parametrelere ait değerler yer almaktadır. 700 kVA nominal güçte, 50 Hz frekansında, birincil voltaj değeri 34.5 kV, ikincil voltaj değeri 0.4 kV olan transformatör kullanılmıştır. Ayrıca sekonder nötr kısmına R1 direnci bağlanmış olup, bu direnç değeri 1 ohm olarak belirlenmiştir.



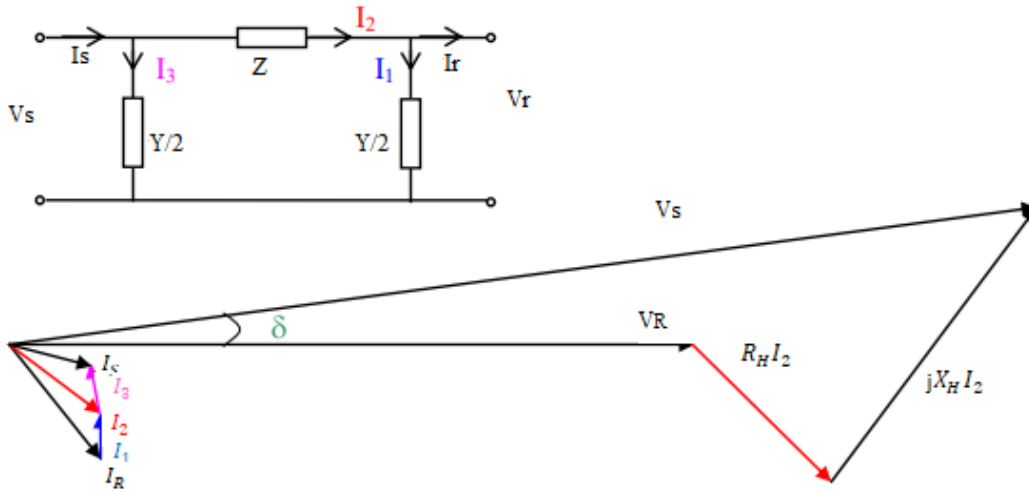
Şekil 3.22 Trafoya Ait Parametreler ve Değerleri.

3.2.4.6 Hat Modellenmesi

Jeotermal elektrik üretim sisteminin şebekeye entegre edilmesinde π tipi hat kullanılmış olup şekilde gösterilmiştir. Bu hattın eşdeğer devre modeli ve fazör diyagramı ise Şekil 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23 π Tipi Hat Blok Diyagramının Simulink'te Modellenmesi.



Şekil 3.24 a) Nominal Pi Devresi Eşdeğer Devre Modeli, b) Nominal Pi Devresi Fazör Diyagramı (İnt. Kyn. 19).

Hat başı ve hat sonu gerilim ve akım değerleri arasında;

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z \frac{Y}{2} & Z \\ Y * (1 + Z \frac{Y}{4}) & 1 + Z \frac{Y}{2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Ve bu bağıntılar genel formda;

$$V_s = A \cdot V_r + B \cdot I_r \quad (3.20)$$

$$I_s = C \cdot V_r + D \cdot I_r \quad (3.21)$$

$$V_s = \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{2}\right) \cdot V_r + Z \cdot I_r \quad (3.22)$$

$$I_s = \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{4}\right) \cdot V_r + \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{2}\right) \cdot I_r \quad (3.23)$$

bağıntıları ile ifade edilirler. Böylece orta uzunlukta ve simetrik yapıda bir hat için A, B, C, D sabitleri;

$$A = D = 1 + Z \cdot \frac{Y}{2 \cdot B} = Z \cdot C = Y \cdot \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{4}\right) \quad (3.24)$$

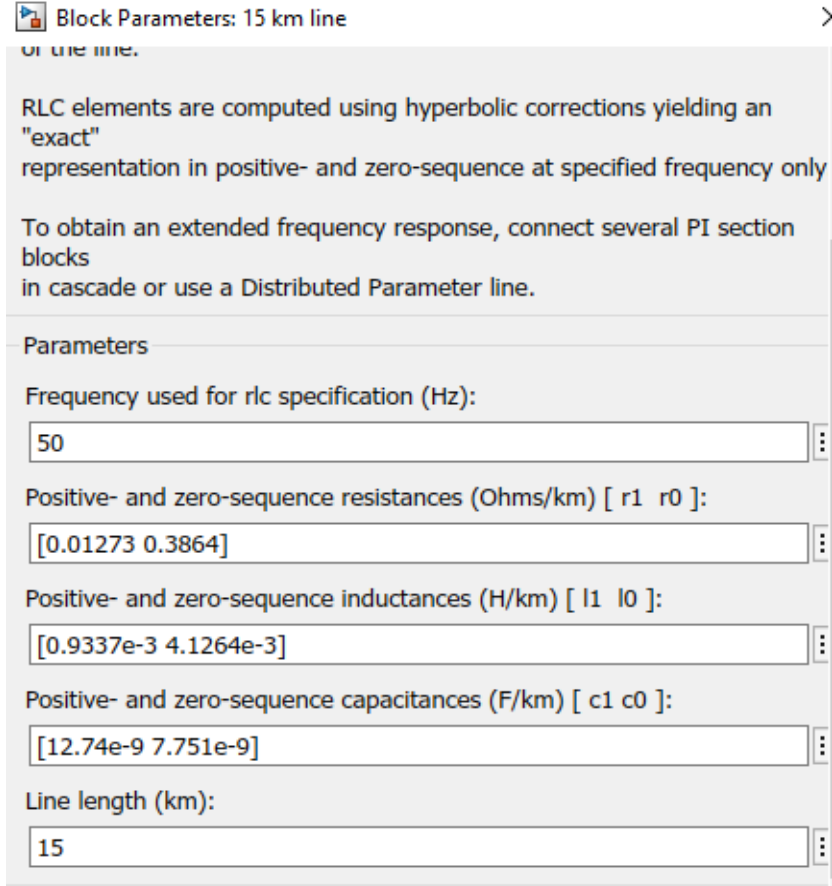
olarak belirlenmektedirler.

Nominal pi devre hat sabitleri için ise;

$$R + j\omega L = l(Z'_{seri}), \quad (1/2)j\omega C = (1/2) * l(Y'_{şönt}) \quad (3.25)$$

basit formülleriyle hesaplanmaktadır. Nominal pi devre, sabit ve toplu parametrelili bir modeldir. Bir başka deyişle sadece seri empedans ve şönt admitans matrislerinin hesaplandığı frekans ve civarında tam sonuçlar verir. Bu nedenle frekanstan bağımsız hat modeli sınıfına girmektedir (Deniz 1995).

MATLAB/Simulink programında Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu'nda kullanılan pi tipi ilerim hattı parametreleri ve bu parametrelerin değerleri Şekil 3.25'te belirtilmiştir. Yukarıdaki hesaplamalar göz önünde bulundurularak 15 km uzunluğunda bir hat kullanılması daha uygun bulunmuştur.



Şekil 3.25 π Tipi Hattın Ait Parametreler ve Değerleri.

3.2.4.7 Ölçüm Bloğu Modellenmesi

Enerji iletim hatlarındaki en önemli parametrelerden biri akım ve gerilim değerleridir. Matlab/Simulink programı içerisinde yer alan üç fazlı ölçü bloğu kullanılarak akım ve gerilim değerleri birlikte hesaplanır. Birim olarak gerçek değerli ve pu cinsinden alınabildiği gibi faz-faz arası gerilim ve faz-toprak arası gerilim değerleri de alınabilir.

Şekil 3.15'te belirtildiği gibi simülasyonda iki adet üç fazlı ölçü bloğu kullanılmıştır. Bunlardan biri jeneratör kesici ve yük arasına diğeri ise gerilim kaynağı ile hat arasına yerleştirilmiştir. Ölçüm bloğu bir, trafo çıkışındaki gerilim ve akım değerini ölçüm bloğu iki ise, şebeke tarafındaki gerilim ve akım değerlerini gösterir.

3.2.4.8 Kaynak Modellenmesi

MATLAB/Simulink programında modellenen Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi'nin şebekeye entegre edilmesi kısmında kuşkusuz en önemli elemanlardan biri de dahili R-L empedansında dengeli üç fazlı gerilim kaynağıdır. Şekil 3.26'da belirtilmiştir. Gerilim kaynağına ait parametreler aşağıdaki gibidir.

Kaynak bağlantı şekli: Yg

Dahili faz-faz arası etkin gerilim değeri: 34.5 kV

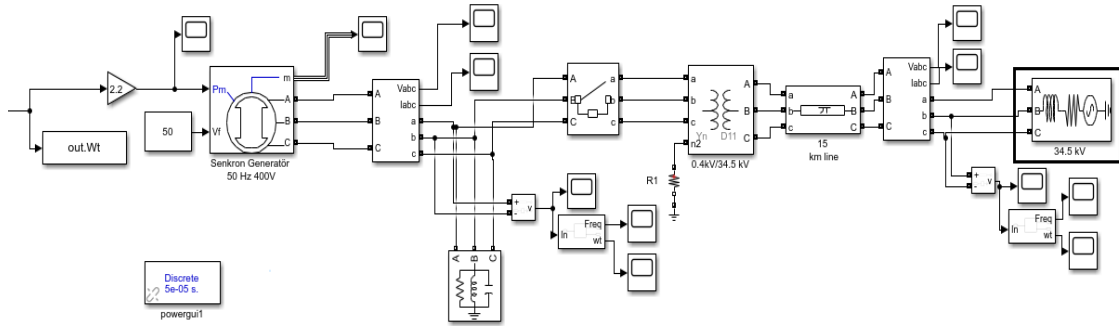
A fazının faz açısı: 0°

Kaynak frekansı: 50 Hz

Kaynak direnci: $1e-5$ ohm

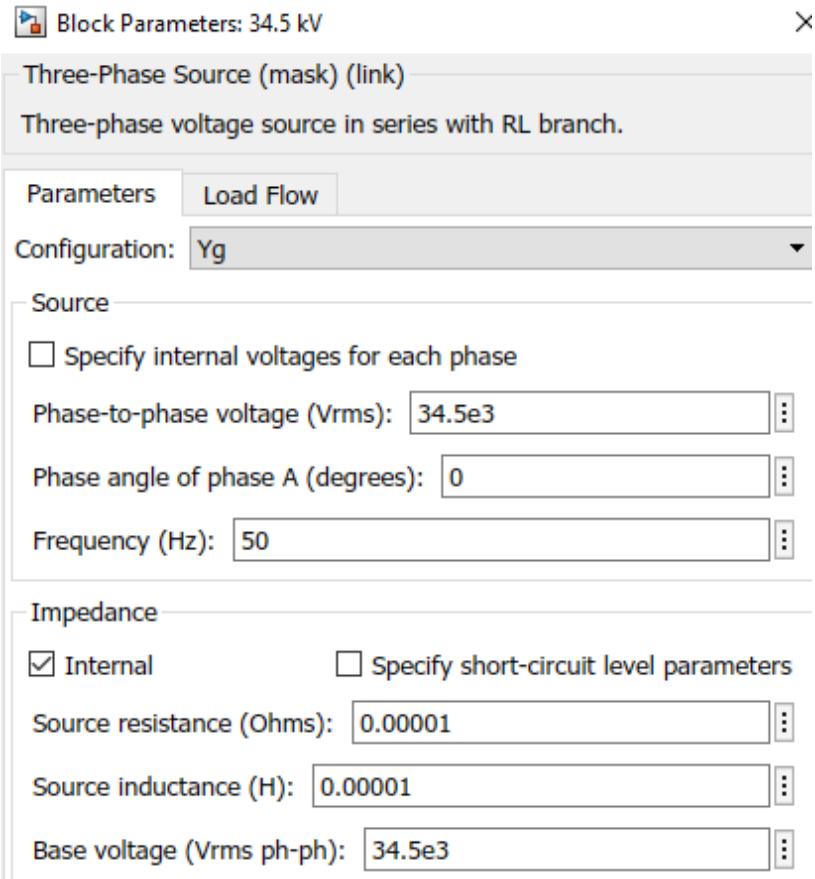
Kaynak indüktans değeri: $1e-5$ H

Faz-faz arası temel voltajın etkin değeri: 34.5 kV



Şekil 3.26 34.5 kV Gerilim Kaynağı Blok Diyagramı.

Şekil 3.27'de MATLAB/Simulink programında modellenmesi yapılan sistemde 34.5 kV gerilim kaynağı blok diyagramına ait parametreler ve bu parametrelerin değerleri gösterilmiştir. Şebeke ile Jeotermal ORC sisteminin senkronize çalışabilmesi için yapılan incelemeler sonucunda bu parametrelerin daha uygun olduğu ön görülmüştür.



Şekil 3.27 Matlab/Simulink Modellemesinde Yer Alan Gerilim Kaynağına Ait Parametreler ve Değerleri.

4. BULGULAR

Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin modellenmesi aşaması materyal metot kısmında tüm detayları ile anlatılmıştır. Şekil 3.16'da Jeotermal Elektrik Üretim Sistemde yer alan Organik Rankine Çevrim sistemi ve şebekede yer alan tüm elemanların modellenmesi yapılmıştır. Bölüm 3'te gösterildiği gibi modelleme aşaması üç ayrı bölümde analiz edilmiştir.

Bunlardan ilki Jeotermal Elektrik Üretim Sistemine ait verilerin EES programında belirtilen formüller aracılığıyla hesaplanarak sıcaklık ve debi değişimlerine bağlı olarak entalpi değerlerinin bulunmasıdır.

İkinci bölümde ise EES programından elde edilen veriler ışığında, ORC sistemine ait elemanların (jeotermal kuyu, ısı değiştirici, türbin, kondenser, pompa) tek tek modellenmesidir. Modelleme yapılırken EES programından elde edilen verilerin yanı sıra, matematiksel denklem takımlarında yer alan enerji yasaları da kullanılmıştır.

Üçüncü bölümde ise, Jeotermal Organik Rankine Çevrim bölümünün şebekeye entegre edilmesidir. Şebeke kısmında yer alan elemanların (jeneratör, ölçü bloğu, yük, kesici, trafo, pi tipi hat, gerilim kaynağı) modellenmesi yapılmış olup, jeotermal ORC modül kısmı ile senkronize çalışabilmesi için uygun parametreler belirlenmiştir.

Jeotermal Elektrik Üretim Sisteme ait sonuçlar iki bölümde incelenmiştir. Bunlardan ilki ORC sisteminde yer alan elemanların çıkış parametreleridir. İkincisi ise bu sistemi şebekeye bağlantısı yapıldığında, sistemin senkronize olması sonrasında elde ettiğimiz frekans, gerilim, akım ve güç değerleridir. Simüle edildikten sonraki elektriksel çıkış değerleri ve grafikleri incelenmiştir.

4.1 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi ORC Sisteminde Modellemesi Yapılan Blokların Sonuçları

Bu bölümde Matlab/Simulink programında modellenmesi ve simülasyonu yapılan Jeotermal Elektrik Üretim kısmının Organik Rankine Çevrimi'ndeki blokların (jeotermal kuyu, ısı değiştirici, türbin, kondenser, pompa) çıkış parametreleri analiz edilmiştir.

Çizelge 4.1 ORC Sisteminde Tasarımı Yapılan Blokların Çıkış Parametreleri.

Jeotermal Kuyu Çıkış Parametreleri	
Jeotermal Suyun Kuyudaki Enerjisi (Q_{in})	14280-34110 kW
Jeotermal Su Giriş Entalpisi (h_{well})	419,2-503,8 kJ/kg
Isı Değiştirici Çıkış Parametreleri	
Isı Değiştiriciden Geçen Enerji (Q_h)	9774,8-35080 kJ/ kg
Isı Değiştirici Sıcaklığı (T_{hot})	90°C-110 °C
Türbin Çıkış Parametreleri	
Türbin Çıkış Gücü (W_t)	1322-4877,9 kW
Generatör Çıkış Parametreleri	
Generatör Çıkış Gücü (P_{go})	793,31-4146,2 kW
Generatörden Geçen Akım (I_g)	127,22-469,37 A
Kondenser (Yoğuşturucu) Çıkış Parametreleri	
Kondenserden Dışarı Aktarılan Isı Miktarı (Q_{con})	8546,5-30511 kJ/kg
Pompa Çıkış Parametresi	
Pompa Çıkış Gücü (W_p)	83-262,75 kW

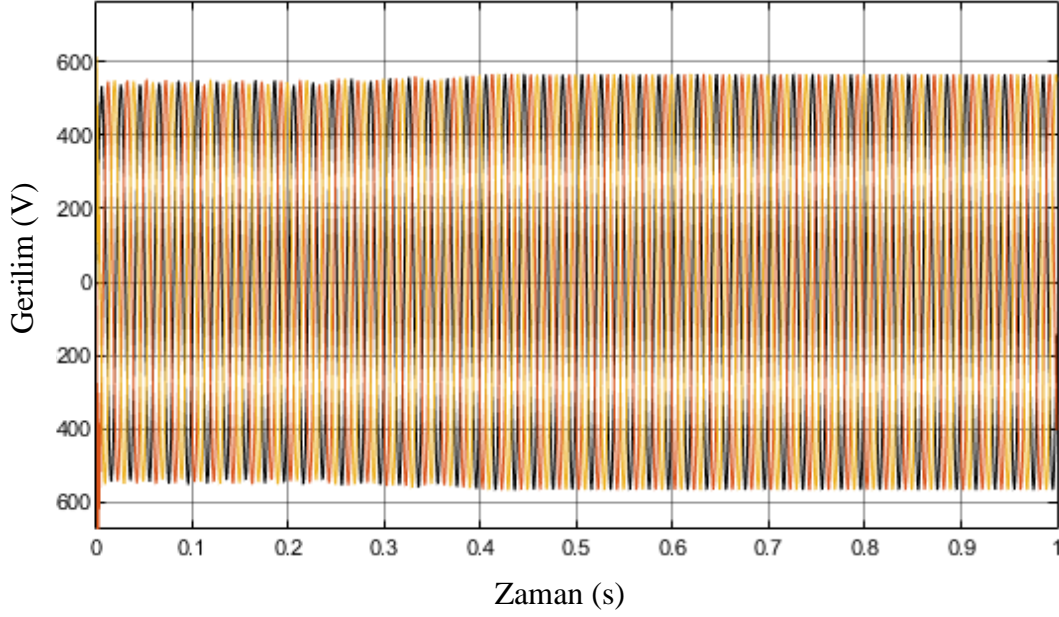
4.2 Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin Şebekeye Entegre Edilmesi

Bu bölümde Matlab/Simulink programında modellemesi ve simülasyonu yapılan Jeotermal Elektrik Üretiminin şebekeye bağlantısı sonucunda, yük ve şebeke tarafında akım, gerilim, frekans değerleri analiz edilmiştir.

Yapılan ölçümler sırasıyla;

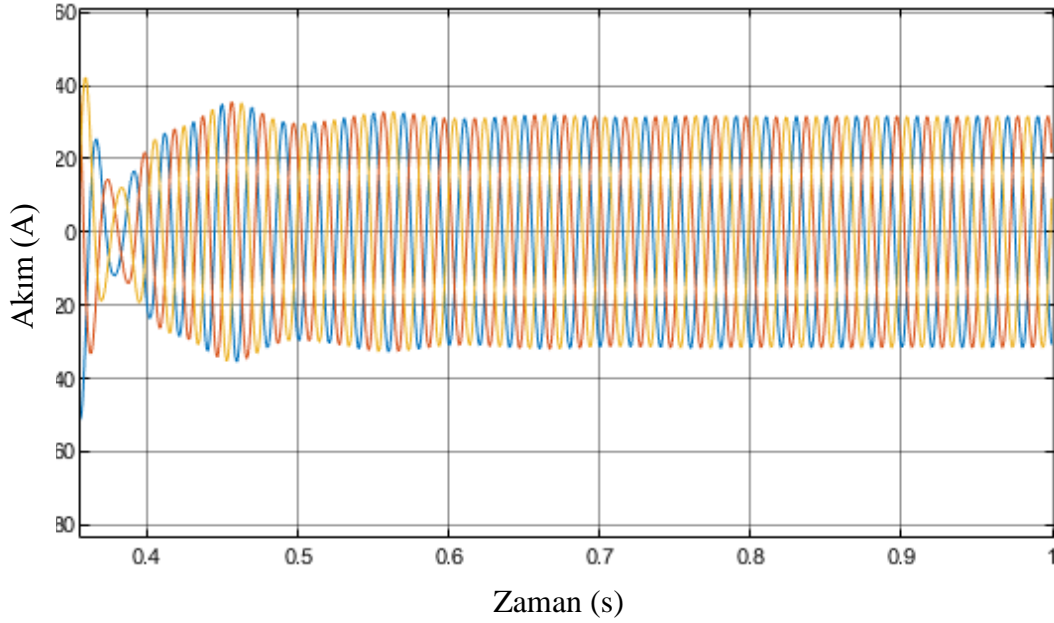
- Jeneratör çıkışındaki gerilim değeri
- Jeneratör çıkışındaki akım değeri
- Yükteki frekans değişimi
- Yükteki rampa çıkışı
- Kesici çıkışı gerilim değeri
- Trafo çıkışı gerilim değeri
- Trafo çıkış akım değeri
- Şebeke tarafı frekans değişimi
- Şebeke tarafı rampa çıkışı

Modeli simüle ettikten sonra, ilk önce jeotermal sistem ile şebeke senkronize çalıştırılmıştır. Ardından jeotermal sistem çıkışına bağlanan jeotermal jeneratöre ait çıkış gerilim akım ile, şebekenin frekans gerilim akım parametrelerine ait değerlerin ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.1’de jeneratör çıkışı ile yük kesici arasına bağlanan üç fazlı ölçüm bloğuna ait gerilim-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.1 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemine Ait Çıkış Gerilim-Zaman Grafiği.

Jeneratör çıkışı ile yük ve kesici arasına konulan üç fazlı ölçüm bloğuna ait gerilim zaman grafiğinde gözlemlendiği üzere $t=0.5$ ‘inci saniyeden itibaren senkronize olduğu ve faz-faz arası gerilimin maksimum değerinin 566.9 V değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Çıkışta elde edilen en yüksek değer, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı yani yaklaşık $1,4142$ katı olduğundan dolayı, jeneratör çıkışındaki A, B, C noktalarına bağlanan ölçüm bloğunda gözlemlenen gerilimin etkin değeri $566.9/\sqrt{2}$ den 400.85 V ‘tur.

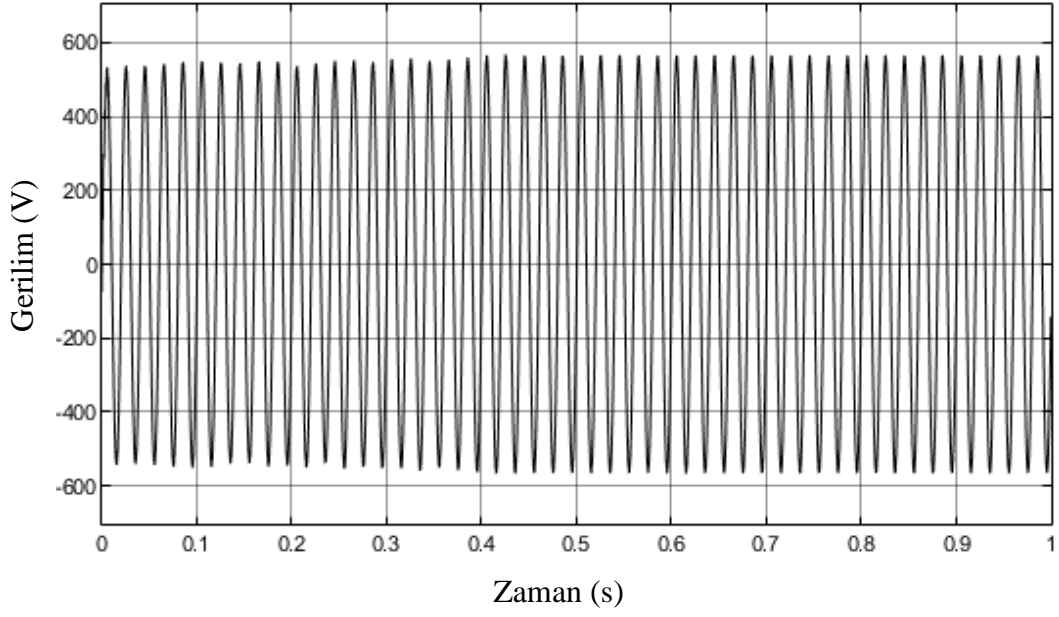


Şekil 4.2 Jeotermal Elektrik Üretim Sistemine Ait Akım-Zaman Grafiği.

Jeneratör çıkışı ile yük ve kesici arasına konulan üç fazlı ölçüm bloğuna ait akım zaman grafiğinde gözlemlendiği üzere, 0.5 ‘inci saniyeye kadar harmonik dalgalanmalar olduğu, sonrasında ise senkronize olduğu ve maksimum değerinin 34.9 A değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Alternatif akım etkin (Irms) değeri, en yüksek değerinin $1/\sqrt{2}$ katı yani yaklaşık 0.707 ile çarpımı sonucu bulunur. Jeneratör çıkışındaki A, B, C noktalarına bağlanan ölçüm bloğundan elde edilen etkin değeri $34.9/\sqrt{2}$ den 24.67 A ‘dir.

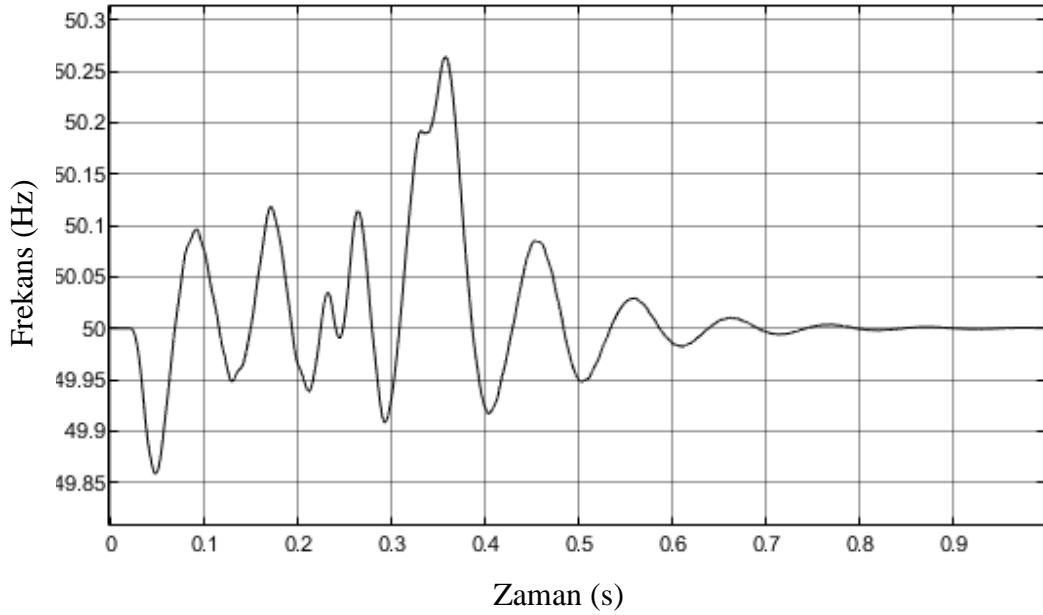
Şekil 4.3’te kesici çıkışından alınan ait gerilim zaman grafiğinde gözlemlendiği üzere $t=0.5$ ‘inci saniyeden itibaren senkronize olduğu ve maksimum değerinin 566.9 V değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Çıkışta elde edilen en yüksek değer, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı yani yaklaşık 1,4142 katı olduğundan dolayı, jeneratör çıkışındaki A, B, C noktalarına bağlanan ölçüm bloğunda gözlemlenen gerilimin etkin değeri $566.9/\sqrt{2}$ den 400.85 V ‘tur.

Kesici 0.5’inci saniyeden itibaren simülasyona katılmıştır. Yani kesici sisteme dahil olduğu andan itibaren az miktarda da olsa gerilimde artış gözlemlenmiştir. Bu sebepten kesicinin çıkışında gözlemlenen etkin değeri 400.85 V’ ta kararlı haldedir.



Şekil 4.3 Kesici Çıkışı Gerilim – Zaman Grafiği.

Şekil 4.4'te Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin şebekeye entegre edilmesinde kullanılan RLC tipi yükten alınan frekans- zaman grafiği verilmiştir.

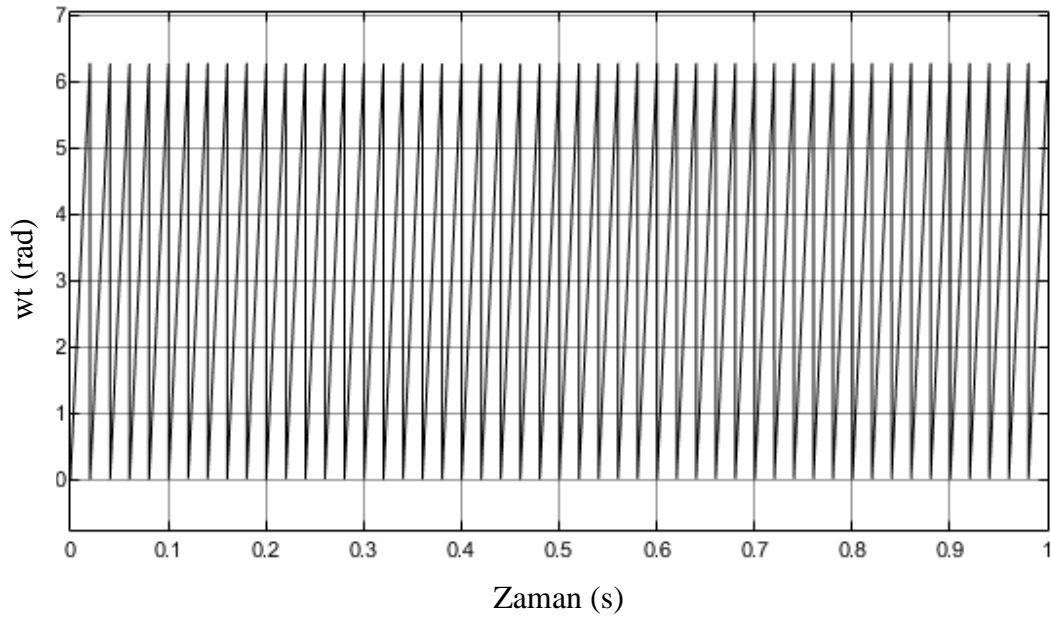


Şekil 4.4 RLC Tipi Yükteki Frekans-Zaman Grafiği.

Şebeke bağlantısı yapılan sistemin frekans, gerilim, akım değerlerinin 0.5'inci saniyeden itibaren sabit olduğu, eş çalışma zamanını 0.5'inci saniyeden itibaren olmuştur. Yük çıkışına bağlanan PLL bloğundan alınan frekans-zaman grafiği göz önünde

bulduğunda, maksimum 50.26 Hz, minimum 49.86 Hz arasında 0.4 Hz/s değişim hızında değiştiği gözlemlenmiştir. Daha sonrasında frekansın 50 Hz' de sabit seyrettiği belirlenmiştir.

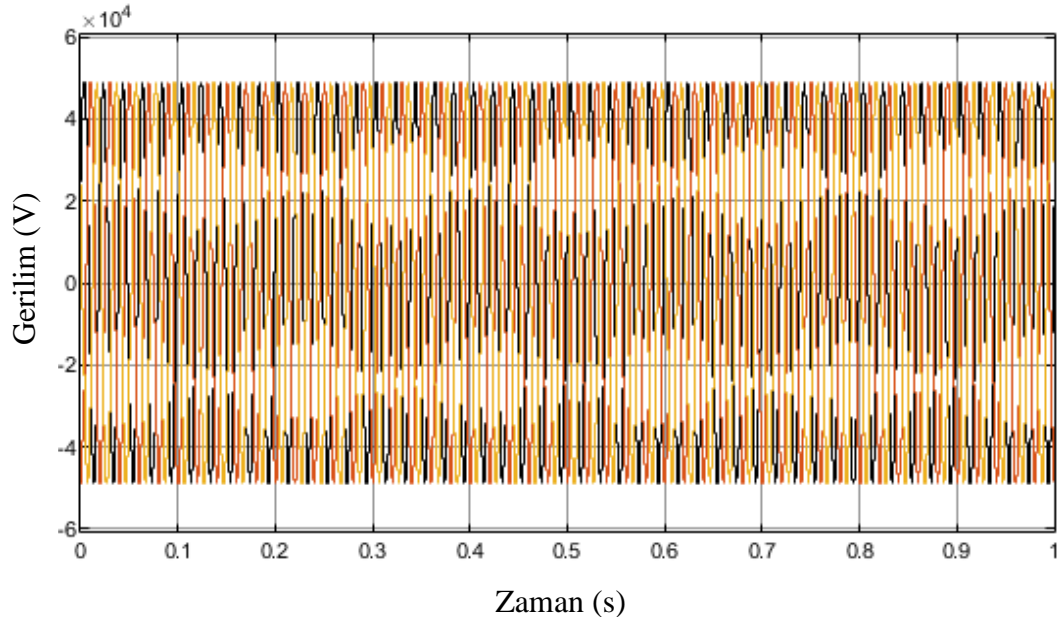
Şekil 4.5'te jeotermal sistemin şebekeye bağlantısında kullanılan RLC tipi yüke bağlanan PLL bloğu çıkışından scope aracılığıyla görüntülediğimiz rampa çıkışı (wt) açısı zaman grafiği yer almaktadır.



Şekil 4.5 Yükteki Rampa Çıkışı Açısı- Zaman Grafiği.

wt çıkışı yani PLL 'nin rampa çıkışı, 0 ve 2π arasında değişen, giriş sinyalinin temelini sıfır geçişinde (yükselen) senkronize edilen açı (radyan) olarak ifade edilir. Senkronize olan bu açının zaman içindeki değeri 0 radyan ile 6.283 radyan arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

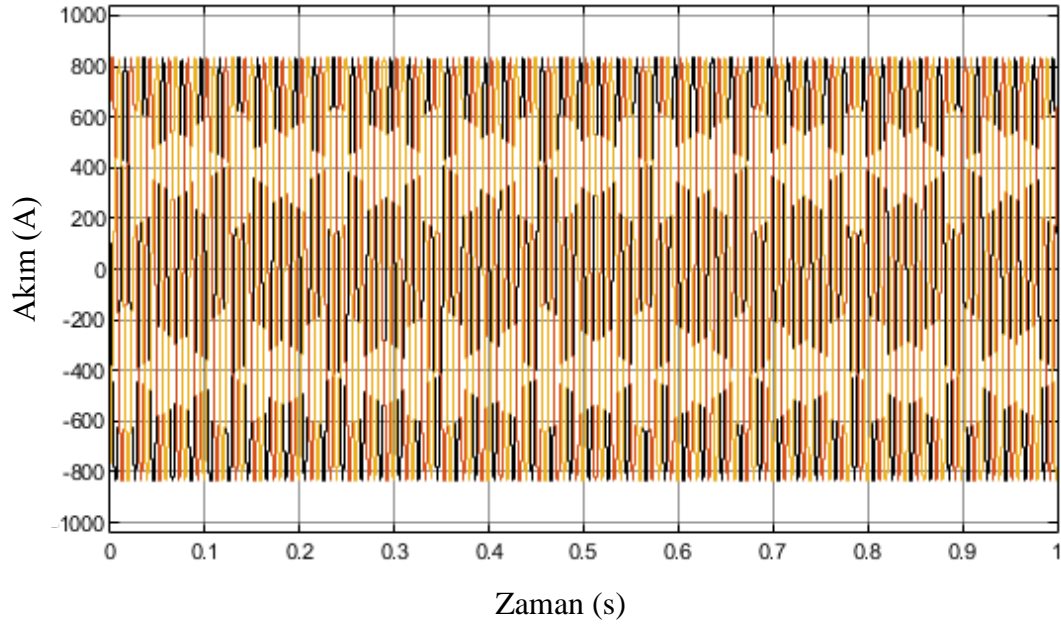
Şekil 4.6'da Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminde ORC kısmının şebekeye bağlantısında kullanılan gerilim kaynağı ile hat arasına bağlanan ölçüm bloğundan elde edilen gerilim değeri gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Şebeke Çıkışındaki Gerilim-Zaman Değişim Grafiği.

34.5 kV değerine sahip gerilim kaynağına bağlanan ölçüm bloğundan elde edilen değere göre 0.5'inci saniyeden itibaren senkronize olduğu gözlemlenmiş ve faz-faz arası gerilimin maksimum değerinin 48.80 kV değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Çıkışta elde edilen en yüksek değer, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı olduğundan, etkin değer $48.80 \text{ kV} / \sqrt{2}$ 'den 34.50 kV olarak bulunur.

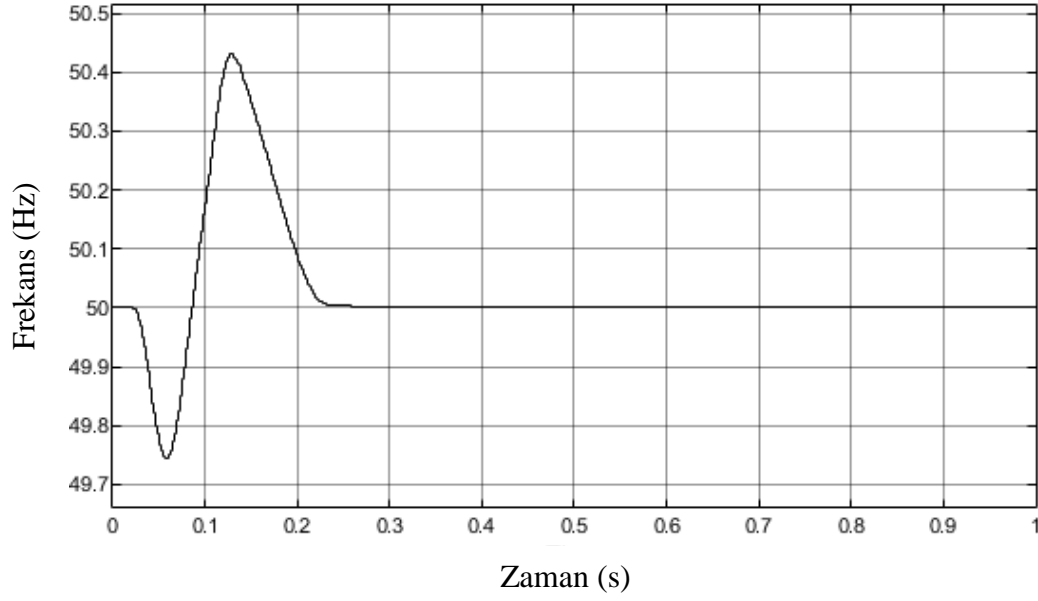
Şekil 4.7 'de Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminde ORC kısmının şebekeye bağlantısında kullanılan gerilim kaynağı ile hat arasına bağlanan ölçüm bloğundan elde edilen akım değeri gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Şebeke Çıkışındaki Akım -Zaman Değişim Grafiği.

34.5 kV gerilim kaynağı çıkışı ile hat arasında konulan üç fazlı ölçüm bloğuna ait akım zaman grafiğinde gözlemlendiği üzere, 0.5 ‘inci saniye sonrasında senkronize olduğu ve maksimum değerinin 834.3 A değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Alternatif akım etkin (I_{rms}) değeri, en yüksek değerinin $1/\sqrt{2}$ katı yani yaklaşık 0.707 ile çarpımı sonucu bulunur. Şebeke çıkışına bağlanan ölçüm bloğundan elde edilen etkin değeri $834.3/\sqrt{2}$ den 589.93 A’dır.

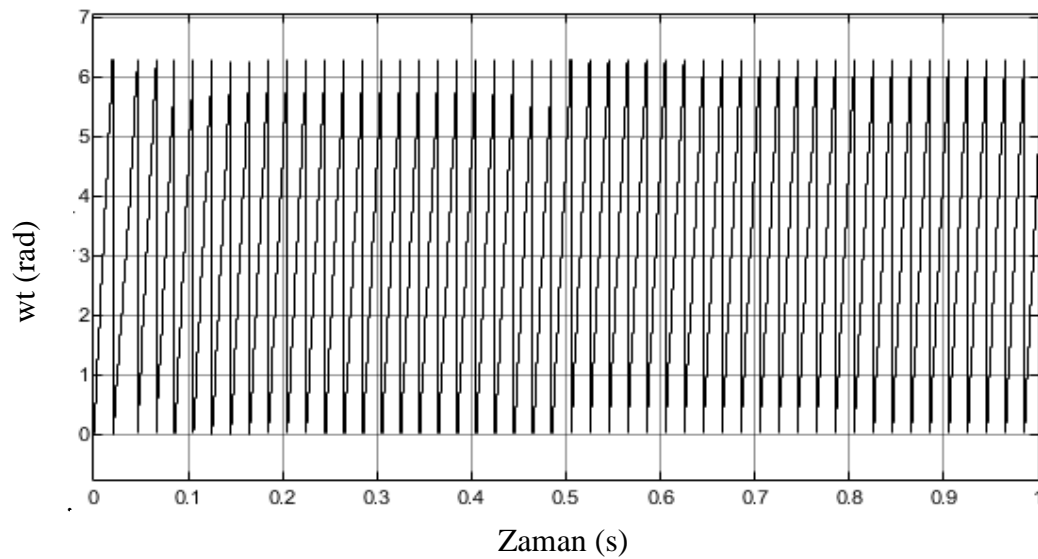
Şekil 4.8’de Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin şebekeye entegre edilmesinde kullanılan 34.5 kV gerilim kaynağı ile üç fazlı ölçüm bloğu arasında bağlanan PLL çıkışından frekans- zaman grafiği analiz edilmiştir.



Şekil 4.8 Şebeke Çıkışındaki Frekans- Zaman Değişim Grafiği.

34.5 kV gerilim kaynağı ile ölçü bloğu arasına bağlanan PLL bloğundan alınan frekans-zaman grafiği göz önünde bulundurulduğunda, maksimum 50.43 Hz, minimum 49.75 Hz arasında 0.68 Hz/s değişim hızında değiştiği gözlemlenmiştir. Daha sonrasında frekans 50 Hz'de kararlı durumdadır.

Şekil 4.9'da jeotermal sistemin şebekeye bağlantısında kullanılan 34.5 kV gerilim kaynağı ile ölçü bloğu arasına bağlanan PLL bloğu çıkışından scope aracılığıyla görüntülediğimiz wt (rampa çıkışı) açi-zaman grafiği yer almaktadır.



Şekil 4.9 PLL Bloğu Çıkışındaki Rampa Çıkışı Açı-Zaman Grafiği.

wt çıkışı yani PLL 'nin rampa çıkışı, 0 ve 2π arasında değişen, giriş sinyalinin temelinin sıfır geçişinde (yükselen) senkronize edilen açı (rad) olarak ifade edilir. Senkronize olan bu açının zaman içindeki değeri 0 radyan ile 6.283 radyan arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Elektriğe ihtiyacın her geçen gün arttığı Dünya’da elektrik üretim yöntemleri çeşitlilik kazanmıştır. Özellikle çevreye zarar vermemesiyle, kaynak bolluğu ve sürdürülebilir yapısıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir. Yenilenebilir enerji sınıfında yer alan kaynaklardan bazıları rüzgâr, güneş, dalga ve jeotermal enerjidir. Yeraltı kaynakları bakımından zengin olan ülkemizde jeotermal enerji önemli yer tutar. Çoğunlukla Ege Bölgesi’nde ve büyük kapasiteli elektrik üretim sistemleri yer almaktadır. Jeotermal su rezervuarlarının sıcaklık değerleri ve santrale olan yakınlığı da üretim kapasitesini etkileyen faktörlerdendir.

Şebekeye entegrasyonu yapılmış Jeotermal Elektrik Üretim Sisteminin senkron çalışabilmesi ve elektriksel çıkış değerlerinin kararlı durumda kalması mühim bir meseledir. Şebekeyi olumsuz etkileyebilecek ani gerilim ve yük değişimlerinin engellenmesi güç elemanlarının sisteme ani girip çıkmasıyla birlikte oluşan dengesizliklerin kaldırılması gerekmektedir.

Enerjinin kaliteli olması için en önemli parametrelerden başlıca olanları gerilim, akım ve frekanstır. Bu parametrelerin değişim veya hatalı sonuçlarının enerjiyi hattında arızaya yol açmaması, uygun değer aralığında değişim göstermesinin bir sonucudur. Şebekenin etkilenmemesi için, şebekeye verilen giriş sistemi ile senkronize şekilde çalışması zorunludur. Şebekede yer alan gerilim ve akım dalga şeklinin optimum yapısından uzaklaşmasıyla, empedans üzerinde gerilim düşümüne sebep olur. Kayıplar daha da büyür ve şebekede yer alan teçhizatların kullanım ömrünün kısılmasına neden olur. Ayrıca jeotermal sistemin enerjinin tahrik için yetmediği durumlarda, şebeke çalışmaya başlar ve yük beslenmesi sağlanır.

Tüm bunlar dışında, jeotermal enerjiden elektrik üretilmesinin yaygınlaştırılması, bu sistemde kullanılan elemanların kullanım ömrünün ve verimliliğinin artırılması gelecek nesillere temiz bir dünya bırakma açısından çok önemlidir. Sadece yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin yaygınlaştırılmasının yeterli olmayacağı, enerji kullanım alışkanlıklarımızı da gözden geçirerek ve farkındalık yaratarak enerjiyi hem verimli hem de tasarruflu kullanmamız gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Matlab/Simulink'te modellenen jeotermal giriş modülü ile şebeke bağlantısının senkron çalışması sağlanmış olup sistem performansını etkileyen elektriksel çıkış değerleri incelenmiştir. Bu değerlerin değişimlerinin Simulink programı üzerinde grafiksel olarak gösterilmiştir. Modellemede yer alan elemanların özellikleri ve modelleme aşamaları detaylıca açıklanmıştır.

Yapılan çalışma kapsamında, öncelikle Organik Rankine Çevrimi'nde yer alan elemanların (jeotermal kuyu, ısı değiştirici, türbin, kondenser, pompa) Matlab/Simulink'te modellenebilmesi gerekli olan değerler için EES programı kullanılmıştır. Bu programda, sıcaklık ve debi değişimlerine bağlı olarak her bir elemanın giriş ve çıkışındaki entalpi değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, Jeotermal Organik Rankine Çevrim sisteminde yer alan her bir elemanın blok diyagramları tek tek modellenmiştir. Jeotermal Elektrik Üretim Santralleri'nin modellemeleri farklı olabilir. Bu tez çalışmasında, Jeotermal Elektrik Üretim sisteminde yer alan elemanların tasarım parametreleri ve jeotermal suyun sıcaklık ve debi değişimlerine bağlı olarak hesaplanan entalpi değerleri hesaplanabilir. Tasarım için Afyon Jeotermal Elektrik Üretim Santrali'nin (AFJES) en uygun işletme şartları göz önünde bulundurulmuştur. Jeotermal suyun, işlemlerden geçerek Organik Rankine Çevrim içerisine dahil olmasıyla türbinden üretilen aktif güç 5240 kW olarak bulunmuştur.

Ardından Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi'nin şebekeye entegrasyonu yapılmıştır. Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi ile şebekeye bağlantısı kurulması noktasındaki en önemli elemanlardan biri kuşkusuz çıkık kutuplu senkron jeneratördür. Bu jeneratör türbin milinden gelen mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye çevirerek alternatif akım üretir. Üretilen elektriksel enerjinin gerilim ve akım değerlerinin bulunması amacıyla, jeneratörün çıkış uçları ile yük arasına üç fazlı ölçü bloğu kullanılmıştır. Jeotermal modül çıkışı ile şebeke arasına, bir adet kesici ve bir adet 2 kW aktif güç değerinde RLC tipi yük bağlanmıştır. Sistemin sağ tarafı yani şebeke kısmında ise 0.4 kV/34.5 kV değerinde transformatör, 15 km değerinde π tipi hat ve 34.5 kV üretim kapasitesinde gerilim kaynağı kullanılmıştır.

Sistemde iki adet ölçüm bloğu ve iki adet PLL kullanılmıştır. Ölçü blokların diğeri ise gerilim kaynağı ile enerji hattının arasına bağlanarak şebeke tarafından alınan gerilim

akım hakkında bilgi verir. Modellemesi yapılan PLL blokları sayesinde yük ve şebekedeki frekans ve PID kontroller ile birlikte senkronize edilmiş sinyalin zaman içerisindeki açısal değişimini gösterir. Sistem performansını etkileyen kalite faktör parametrelerinin (frekans, gerilim, akım) ölçümleri yapılmıştır.

Modellemeden kaynaklı olarak, Afyon Jeotermal Elektrik Santrali'nde elektriksel iç ihtiyaç talebini karşılayabilmek adına gerilim değeri fazlar arası 400 V'a düşürülerek simülasyonu yapılmıştır.

Bulgular kısmında yer alan grafiksel sonuçlar ışığında, Jeotermal Elektrik Üretim sistemi ile elektrik şebekesi arasında eş zamanlı çalışma süresi 0.5'inci saniyeden itibaren başlamıştır. Senkronizasyon sonrası alınan grafiksel figürler incelendiğinde, harmoniklerin çok azaldığı veya bittiği, frekans gerilim, akım değerlerinin beklenen değerlerde ve durağan olduğu gözlemlenmiştir.

Şebekeye entegre edilmiş Jeotermal Elektrik Üretim Sistemi'nin modellenmesi aşamalarında anlatıldığı gibi, EES programından elde edilen sonuçlar tek tek Matlab/Simulink programında giriş yapılarak oluşturulmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalar içerisinde, EES programından elde edilen veriler direkt olarak Matlab/Simulink programına çekilmesi yapılabilir veya otomatik kontrol sistemi eklenerek, optimum çalışma değerlerinin altına düştüğünde uyarı sistemi oluşturulabilir.

Söz konusu proje hem daha interaktif hem de daha ideal sonuçlar içererek elektriksel çıkış değerlerini analiz ve değerlendirme açısından fazlasıyla katkı sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında, jeotermal/yenilenebilir enerjiden elektrik üretim sistemine yönelik yapılacak verimli çalışmalara ve inovatif düşünce yapılarına ışık tutması temennisiyle.

6. KAYNAKLAR

- Berkün M, Aras E, Koç T, 2008, Barajların ve Hidroelektrik Santrallerinin Nehir Ekolojisi Üzerinde Oluşturduğu Etkiler, Türkiye Mühendislik Haberleri, 452, 41-48.
- Bilen K, Kalkışım A T, Solmuş İ, Bulgurcu H, Yaldirak H, 2014, Otomobil Klima Sistemlerinde R-152a Gazı Kullanımı ve Özellikleri, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 144, 89-97.
- Boran K, Menlik T, Alpsoy H, 2015, R134a/R152a Soğutucu Akışkan Karışımlarının Performanslarının Isı Pompasında Deneysel Olarak Araştırılması, Politeknik Dergisi, 251-256.
- Çengel Y A, Boles M A, 1996, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik (2.Baskı), Çev: Derbentli T, Literatür Yayıncılık, 870s, İstanbul.
- Demirdelen T, Tan A, İnci M, Köroğlu T, Büyük M, Terciyanlı A, vd., 2013, Şebekeye Bağlı Sistemler için Üç Faz Ve Tek Faz PLL'lerin Performans Değerlendirmesi, 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 5-9.
- Deniz T, 1995, EMPT ile Enerji İletim Sistemlerinde Açma-Kapama Olayları Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, İstanbul.
- Devlet Planlama Teşkilatı, 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu Jeotermal Enerji Çalışma Grubu, DPT Rapor No: 2609, 53s.
- Ercan E, 2017, Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi ve Jeotermal Enerjide Organik Rankine Çevrimi Teknolojisi, Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi, 18(132), 42-44, ISSN 1305-2047.
- Erdoğan S, 2016, Arz Güvenliği Bakışı ile Türkiye'de Enerji Politikaları, Orion Kitapevi, 272s, Ankara.
- Ertürk F, Akkoyunlu A, Varınca K, 2006, Enerji Üretimi ve Çevresel Etkileri, Stratejik Rapor No: 14, 87s.

- Ergün A, 2014, Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralinin Termodinamik Analizi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 91s, Karabük.
- Ergün A, Özkaymak M, Kılıçaslan E, 2016, Organik Rankine Çevrimi Prensibi ile Düşük Sıcaklıktaki Kaynaklardan Elektrik Üretim Uygulamaları, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 686-696.
- İnce U, 2005, A Case Study of Material Testing for Corrosion In Low Temperature Geothermal Systems, the Graduate School of Engineering and Science of Izmir Institute of Technology, Master Thesis, 119p, İzmir.
- Lampe M, Stavrou M, Bücker H M, Gross J, Bardow A, 2014, Simultaneous process and working fluid optimization for Organic Rankine Cycles (ORC) using PC-SAFT, Industrial and Engineering Chemistry Research, American Chemical Society, 53, 8821-8830, ISSN: 1520-5045.
- Lindal B, 1973, Industrial and other applications of geothermal energy, Geothermal Energy, Armstead, H.C.H. (Ed.), UNESCO, 135-148, Paris.
- Manente G, 2014, A Meanline Model To Predict The Design Performance of Radial Inflow Turbines In Organic Rankine Cycles, Anno Accademico 2013/2014 Università Degli Studi di, 145p, Padova.
- Obafunmi J S, 2014, Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycles, Eastern Mediterranean University, Thermodynamic Institute of Graduate Studies and Research, Master Thesis, 47p, Gazimağusa, North Cyprus.
- Öztemir M H, 2011, Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi ve Aydın-Salavatlı Sahası Elektrik Üretim Santrali, MMO, 9-15.
- Öztürk H H, 2008, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı, Teknik Yayınevi, 376s, Ankara.
- Quoilin S, Broek M V D, Declaye S, Dewallef P, Lemort V, 2013, Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 168–186.

- Satman A, 2003, Jeotermal Enerjinin Doğası, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi-Jeotermal Enerji Semineri, İzmir.
- Sözen E, Gündüz G, Aydemir D, Güngör E, 2017, Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 19 (1), 148-160.
- Spadacini C, Rizzi D, Saccilotto C, Salgarollo S, Centemeri L, 2013, The Radial Outflow Turbine Technology, Impact on the Cycle, Thermodynamics, Machinery Fluid and Rotor Dynamic Features, 2 nd International Seminar on ORC Power Systems, 7-8 October, Rotterdam.
- Spadacini C, Xodo L, Quaia M, 2015, Jeotermal Enerji Semineri Bildirisi, Jeotermal Organik Radyal Dış Akış Türbini, TMMOB Makine Mühendisleri Odası 12. Ulusal Tesisat Mühendisli Kongresi, 8-11 Nisan, İzmir, 64-65.
- Sukhatme S P, Nayak J K, 2017, Solar Energy-Fourth Edition, MC Graw Hill Education, 568s., India.
- Şahin C, 2016, Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Sahalarda Organik Rankin Çevrimi (Orc) ile Elektrik Enerjisi Üretiminde Afyon Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. Modellemesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Kütahya.
- Yılmaz C, 2020, Improving Performance and Thermoeconomic Optimization of an Existing Binary Geothermal Power Plant: A Case Study, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 40(1), 37-51, ISSN 1300-3615.
- Yılmaz F, 2013, Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Isparta.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.afjet.com.tr/AnaSayfa>, 03.10.2021
- 2- https://yenader.org/tr_tr/biyokutle-enerjisi-nedir/, 15.04.2020
- 3- <https://www.conserve-energy-future.com/waveenergy.php>, 12.05.2020
- 4- <https://vcantugakkas.wordpress.com/2017/03/30/jeotermal-enerji-arama-teknikleri/>, 20.06.2020
- 5- https://tr.wikipedia.org/wiki/Jeotermal_enerji, 20.06.2020
- 6- https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/18479/mod_resource/content/0/YEN%20ENERJ%20KAYNAKLARI%20VE%20TEKNOLOJ%20BOLER%20.pdf, 08.07.2020
- 7- <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari>, 13.08.2020
- 8- https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369%23.WTSqKWjyhPY, 23.08.2020
- 9- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-jeotermal>, 14.09.2020
- 10- http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/29295d860c049a9_ek.pdf, 17.09.2020
- 11- <https://www.bilgiustam.com/jeotermal-enerji-santralinin-parcalari/>, 30.09.2020
- 12- <https://elektrikinfo.com/jeotermal-enerji-nedir/>, 07.10.2020
- 13- https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/7.2.Power_from_GE.pdf, 18.10.2020
- 14- <https://docplayer.biz.tr/6320289-Jeotermal-enerji-ve-elektrik-uretimi.html>, 01.11.2020
- 15- <http://www.aktermmekanik.com.tr/hizmetler/organik-rankine-cevrim-tesisleri>, 10.12.2020
- 16- https://en.wikipedia.org/wiki/Engineering_Equation_Solver, 10.12.2020
- 17- <https://tr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>, 10.12.2020
- 18- <https://muhendistan.com/3-fazli-trafo-nedir/>, 11.01.2021
- 19- https://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/0618_2310_dosya.pdf, 02.02.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve Çine
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar 04/04/1995
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : mervecine@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi (2009 – 2013)
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve
Haberleşme Mühendisliği Bölümü (2013– 2018)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2019 –
2022)

EKLER

EK 1. Afjes'ten Verilerin Kullanımına İlişkin İzin Belgesi



AFJET

ÇEVREYLE DOST

AFJET AFYON JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİM
TESİSLERİ TURİZM SAN. Ve TİC. A.Ş.

Adres : Atatürk Caddesi Devlet Hastanesi Yanı Merkez / AFYONKARAHİSAR
Tel : 0 (272) 213 17 23 Fax : 0 (272) 215 72 47
Web : www.afjet.com.tr E mail : afjet@afjet.com.tr

Sayı: 2021 / 737

29.06.2021

Konu: 22.06.2021 tarihli dilekçeniz hk.

Sn. Merve ÇİNE;

Şirketimize ait Jeotermal Elektrik Üretim Santraline ait tarafınızla paylaşmış olduğumuz verilerle sınırlı olmak üzere yüksek lisans tezinizde bu verilerin kullanılması uygundur.

Bilgilerinize rica ederim.


Dr. Yusuf ULUTÜRK
Genel Müdür

EK 2. EES (Engineering Equation Solver) Programına Ait Bazı Kodlamalar

Santrale Ait Giriş Verileri

Fluid1\$='steam_iapws'

Fluid2\$= 'R134a' {'isobutane'}

"T_geo[1]=110 [C]"

"m_geo=150 [kg/s]"

eta_P=0,85

eta_T=0,85

P[1]=500 [kPa]

T[3]=T_geo[1]-10

P[3]=2800 [kPa]

P[4]=P[1]

P[2]=P[3]

P[8]=P[7]

P[7]=P[0]

T_0=T[0]+273

"Pump"

h[1]=enthalpy(Fluid2\$, P=P[1]; x=x[1])

v[1]=volume(Fluid2\$, P=P[1]; x=x[1])

w_P=v[1]*(P[2]-P[1])/eta_P

h[2]=h[1]+w_P

"Heat exchanger"

T[1]=Temperature(R134a;P=P[1];h=h[1])

T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];h=h[2])

T[4]=Temperature(R134a;P=P[4];h=h[4])

T[5]=T_geo[1]

T[6]=T_geo[2]

"Turbine"

h[3]=enthalpy(Fluid2\$, P=P[3]; T=T[3])