

**JEOTERMAL ENERJİ DESTEKLİ ORGANİK
RANKİNE ÇEVİRİMİNDE ALTERNATİF AKIŞKAN
KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

**2016
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Göknur KAYATAŞ

**JEOTERMAL ENERJİ DESTEKLİ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE
ALTERNATİF AKIŞKAN KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Göknur KAYATAŞ

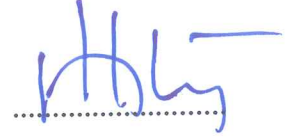
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Eylül 2016**

Göknur KAYATAŞ tarafından hazırlanan "JEOTERMAL ENERJİ DESTEKLİ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE ALTERNATİF AKIŞKAN KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 21/09/2016

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)

İmzası



...../...../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Göknur KAYATAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JEOTERMAL ENERJİ DESTEKLİ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNDE ALTERNATİF AKIŞKAN KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Göknur KAYATAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Eylül 2016, 84 Sayfa

Ülkemiz için çok önemli bir potansiyel teşkil eden jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlar. Ülkemizde elektrik üretimine uygun olmayan 90 ile 125 ° C arasında olan büyük kapasitede birçok jeotermal sahanın var olduğu bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda sadece ısıtma amaçlı olarak kullanılmasının yanı sıra Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) gibi sistemler uygulanarak elektrik üretimine dolayısıyla ekonomiye kazandırılması sağlanmaktadır. Bu çalışmamızda, düşük sıcaklığa sahip atık ısı kaynaklı ORÇ prensibine göre çalışan bir sistemin tasarımı ve imalatı yapılarak güç üretimi elde etmeye çalışılmıştır. Sistemde R134a ve R22 çalışma akışkanlarını kullanarak deneysel çalışması yapılmış sistemin performans ve verim analizleri elde edilmiştir. R22 akışkanın termal verimi R134a'dan daha yüksek olmasına rağmen R134a gazı ile yapılan deneylerde daha yüksek net iş elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Jeotermal enerji, organik rankine çevrimi, yenilenebilir enerji.

Bilim Kodu : 920.1.189

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USE OF ALTERNATIVE FLUID ON ORGANIC RANKINE CYCLE WITH GEOTHERMAL ENERGY

Göknur KAYATAŞ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

September 2016, 84 pages

Renewable energy resources like geothermal energy constitute important potential for our country that they contribute to country's economy when they are used. It is known that in our country there are a lot of geothermal area unsuitable for electric's manufacture where have big capacity between 90-125 °C. Besides, it is user just heating telic low temperature, system like Organik Rakine Çevrimi (ORÇ) is brought to economy. In our working a system's design and manufacturing is done and worked obtaining power's manufacture according to originating from waste that it has low temperature. In the system performance and efficiency analysis of system has obtain that it has done experimental working using R134a and R22 working fluids. Doing experiments with R134 gas has obtain higher work although R22 fluids' thermal efficiency higher than R134a.

Key Words : Geothermal energy, organic rankine cycle, renewable energy.

Science Code: 920.1.189

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, yürütülmesinde yardım ve desteklerini eksik etmeyen çok kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK hocama teşekkürlerimi sunarım.

Ölçümler esnasında bilgisini ve yardımını esirgemeyen, çalışmanın yönlendirilmesine ve sonuçlandırılmasına destek olan Yrd. Doç. Dr Alper ERGÜN' e ve danışmanlığını yaptığı lisans tez öğrencilerine deney aşamasındaki destekleri için teşekkür ederim. Karabük Üniversitesi TOBB Meslek Yüksekokulu Sivil Savunma ve İtfaiyecilik Bölümü hocalarına, Gaz ve Tesisatı Bölümü hocalarına ve dersine girdiğim öğrencilere teşekkür ederim.

Manevi desteklerini esirgemeyen KÜRTÜL ailesine, Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL ve eşi Leyla KÜRTÜL' e teşekkür ederim.

Elektronik malzemelerimin teknik problemlerinde yardımını esirgemeyen proje arkadaşım Kazım ONGUN' a teşekkür ederim.

Her zaman maddi manevi destek sağlayan, bana güvenen canım aileme özellikle dedem Hacı Ziyattin KAYATAŞ' a ve kıymetli babam Mustafa KAYATAŞ' a, fikirleriyle bana önder olan amcam Ömer Lütfü KAYATAŞ' a duasını, sevgisini esirgemeyen Hacı Babaannem Fadime KAYATAŞ ve annem Hatice KAYATAŞ' a, ablam Duygu BALKAY ve biricik kardeşim Fatih Adem KAYATAŞ' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
LİTERATÜR TARAMASI.....	6
BÖLÜM 3	15
JEOTERMAL ENERJİ	15
3.1. JEOTERMAL ENERJİ KULLANIM ALANLARI.....	19
3.2. DÜNYADA JEOTERMAL ENERJİ	22
3.3. TÜRKİYEDE JEOTERMAL ENERJİ	24
3.4. JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	28
3.4.1. Kuru – Buhar Elektrik Santralleri.....	28
3.4.2. Tek Flaş (Tek Püskürtmeli) Elektrik Santralleri.....	29
3.4.3. Çift Flaş (Çift Püskürtmeli) Elektrik Santralleri.....	30
3.4.4. İkili Çevrim (Binary) Elektrik Santralleri.....	31
3.4.5. Kalina Çevrim Elektrik Santralleri	33

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4	35
ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ	35
4.1. BASİT RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	37
4.2. İDEAL RANKİNE ÇEVİRİMİ	38
4.3. REJENERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	40
4.4. SÜPERKRİTİK ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	42
4.5. REKÜPERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	43
4.6. ORÇ SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ALANLARI.....	43
4.6.1. İkili Jeotermal Güç Sistemleri	44
4.6.2. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri	45
4.6.3. Güneş Enerjili ORÇ Sistemleri.....	47
4.6.4. Biyokütle Kaynaklı ORÇ Sistemleri	48
4.7. ORÇ SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI.....	49
4.8. ORÇ SİSTEMLER İÇİN ÇALIŞMA SIVISININ SEÇİLMESİ.....	51
BÖLÜM 5	54
MATERYAL VE METODLAR.....	54
5.1. TERMODİNAMİK ANALİZ	54
5.2. KULLANILAN EKİPMANLAR.....	57
5.2.1. Ana Elemanlar	57
5.2.2. Bağlantı Ekipmanları	60
5.2.3. Ölçüm Elemanları.....	61
BÖLÜM 6	62
DENEYSEL ÇALIŞMA	62
6.1. KULLANILAN ORGANİK AKIŞKANLAR.....	62
6.2. R134a ORGANİK AKIŞKANINA GÖRE 10 DAKİKALIK ARAYLA ALINMIŞ VERİ DEĞERLERİ.....	63
6.3. R22 ORGANİK AKIŞKANINA GÖRE 10 DAKİKALIK ARAYLA ALINMIŞ VERİ DEĞERLERİ.....	65
BÖLÜM 7	67
DENEY SONUÇLARI	67

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8	77
SONUÇ VE ÖNERİLER	77
8.1. SONUÇLAR	77
8.2. ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. İdeal bir jeotermal sistemin şematik görünümü	17
Şekil 3.2. Güç santrallerinin karşılaştırılması	18
Şekil 3.3. Jeotermal enerjinin sıcaklığına göre kullanım alanları (lindal diyagramı)	20
Şekil 3.4. Entegre jeotermal uygulamalar	22
Şekil 3.5. Dünyada jeotermal enerjinin elektrik dışı uygulamaları	23
Şekil 3.6. Türkiye'deki genç tektonik hatlar ve sıcak su kaynaklarının dağılımı	26
Şekil 3.7. Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış şeması	29
Şekil 3.8. Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış şeması ..	29
Şekil 3.9. Tek flaş (tek püskürtmeli) jeotermal elektrik santrali	30
Şekil 3.10. Çift flaş (çift püskürtmeli) jeotermal elektrik santrali.....	31
Şekil 3.11. İkili jeotermal elektrik santrali	32
Şekil 3.12. Kalına tip binary sistemden elektrik üretimi	34
Şekil 4.1. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması	36
Şekil 4.2. ORÇ basınç entalpi (P-H) diyagramı	37
Şekil 4.3. Basit ORÇ sistemi ve T-S diyagramı	38
Şekil 4.4. Temel ideal rankine güç çevrimi ve T-S diyagramı.....	39
Şekil 4.5. Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması.....	41
Şekil 4.6. Rejenaratif Organik Rankine Çevriminin T-S diyagramı	41
Şekil 4.7. Süperkritik Organik Rankine Çevriminin T-S diyagramı	42
Şekil 4.8. Reküperatif ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı	43
Şekil 4.9. İkili jeotermal elektrik santrali	44
Şekil 4.10. Termal yağ kullanılan atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri.....	46
Şekil 4.11. Doğrudan ısı değiştiricili atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri	46
Şekil 4.12. Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri	48
Şekil 4.13. Birleşik ısı ve güç üretim sistemlerinin şematik şekli.....	49
Şekil 4.14. Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı	51
Şekil 5.1. Tasarımı yapılan sistemin şematik gösterimi	55

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.2. Hazırlanan ORÇ deney düzeneği	56
Şekil 5.3. Hazırlanan ORÇ deney düzeneği 2	57
Şekil 5.4. Türbin	58
Şekil 5.5. Pompa.....	58
Şekil 5.6. Isı değiştiriciler.....	59
Şekil 5.7. Çamaşır makinesi pompası	59
Şekil 5.8. Elektrik ısıtıcılı kazan	59
Şekil 5.9. Sıvı deposu	60
Şekil 5.10. Manometre	60
Şekil 5.11. Gözetleme camı.....	60
Şekil 5.12. Termostat.....	61
Şekil 5.13. Debimetre.....	61
Şekil 7.1. R134a ve R22 akışkanlarının debi değerleri	68
Şekil 7.2. R134a akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri	69
Şekil 7.3. R134a akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği net enerji değerleri.....	70
Şekil 7.4. R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri	71
Şekil 7.5. R22 akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri	72
Şekil 7.6. R22 akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri....	73
Şekil 7.7. R22 akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri	74
Şekil 7.8. R134a – R22 akışkanının türbinden ürettiği net iş karşılaştırılması	75
Şekil 7.9. R134a – R22 akışkanının termal verimlerinin karşılaştırılması.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Türkiye’de elektrik üretimine uygun jeotermal sahalar	25
Çizelge 3.2. Türkiye’nin yakıt cinslerine göre kurulu güç dağılımı	27
Çizelge 6.1. R134a Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Birinci 10 dakikada)	63
Çizelge 6.2. R134a Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (İkinci 10 dakikada)	63
Çizelge 6.3. R134a Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Üçüncü 10 dakikada)	64
Çizelge 6.4. R134a Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Dördüncü 10 dakikada)	64
Çizelge 6.5. R134a Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Beşinci 10 dakikada)	64
Çizelge 6.6. R22 Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Birinci 10 dakikada)	65
Çizelge 6.7. R22 Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (İkinci 10 dakikada)	65
Çizelge 6.8. R22 Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Üçüncü 10 dakikada)	65
Çizelge 6.9. R22 Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Dördüncü 10 dakikada)	66
Çizelge 6.10. R22 Organik Akışkan için hesaplanmış veriler (Beşinci 10 dakikada)	66
Çizelge 7.1. R134a ve R22 akışkanlarının debi değerleri	67
Çizelge 7.2. R134a akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri ..	68
Çizelge 7.3. R134a akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.....	69
Çizelge 7.4. R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri .	70
Çizelge 7.5. R22 akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.....	71
Çizelge 7.6. R22 akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.....	72
Çizelge 7.7. R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri .	73
Çizelge 7.8. R134a – R22 akışkanların türbinden ürettiği net enerjilerin karşılaştırılması	74

Sayfa

Çizelge 7.9. R134a – R22 akışkanının termal verimlerinin karşılaştırılması 75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

\dot{m}	: Kütlesel debi (kg/s)
q_g	: Giren ısı miktarı (kW)
$q_ç$: Çıkan ısı miktarı (kW)
W_g	: Giren iş enerjisi (kW)
$W_ç$: Çıkan iş enerjisi (kW)
h	: Entalpi (kJ/kg)
η_{th}	: Isıl verim (%)
η_{termal}	: Termal verim (%)
$\eta_{ekserji}$: Ekserji verimi (%)
P	: Basınç (<i>bar</i>)
T_0	: Çevre sıcaklığı ($^{\circ}C, K$)
W	: İş enerjisi (kW)
W_{pompa}	: Pompa işi (kW)
$W_{türbin}$: Türbin işi (kW)
W_{net}	: Net iş (kW)
E	: Evaporatör
C	: Kondanser
S	: Özgül Entropi (kJ/kg K)
E_x	: Ekserji akımı (kW)
kg	: Kilogram
kw	: Kilowatt
s	: Saniye
ΔT	: Sıcaklık farkı ($^{\circ}C, K$)
cp	: Özgül ısı kapasitesi
%	: Yüzde

Q_{giren} : Giren ısı miktarı (kW)

o,a : Organik akışkan

Q : Isı enerjisi (kW)

KISALTMALAR

ORÇ : Organik Rankine Çevrimi

ODP : Ozon Delme Potansiyeli

GWP: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)

JEO : Jeotermal Akışkan

EES : Engineering Equation Solver (Mühendislik Denklem Çözücü)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ülkemiz enerji bakımından dışa bağılı bir ülke olup, enerji ihtiyacının yarısından fazlasını dışarıdan karşılamakta, dolayısıyla bu durumda ülke ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Ülkemizin sahip olduğu fosil kaynaklar enerji ihtiyacını karşılayacak seviyede olmayıp, var olan linyit kömürlerimiz de hem düşük kalorili hem de kükürt ve kül içeriği yüksek değerdedir. Günümüzde enerji ihtiyacının % 70'ini ithal kaynaklardan karşılamak durumunda olan ülkemizde, gerekli önlemler alınmazsa enerji konusunda dışa bağımlılık giderek artış gösterecektir. Dünyadaki fosil kökenli yakıt kaynakların azalmasının yanı sıra bunların kullanımı ile meydana gelen çevre kirliliği ve küresel ısınma son zamanlarda enerji üretimi alanındaki çalışmaların yenilenebilir ve temiz enerji üreten kaynaklar üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. Türkiye'nin coğrafi yapısı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması bakımından avantajlı bir konuma sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji; ucuz, yerli, temiz, güvenilir ve sürdürülebilir olma gibi özellikleri ile öne çıkan bir enerji türüdür. Enerjinin güvenli ve sürdürülebilir temini, temiz oluşu, çevreye verilen zararı en aza indirme amacı, fosil kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmaktadır [1].

Dünyadaki jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesislerinin çoğunluğu 1973 petrol krizinden sonra aktif hale geçmiştir. Bu dönemde elektriğe duyulan ihtiyaç, ülkeleri alternatif enerji kullanımına yönlendirmiştir. Jeotermal enerji, alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden bir tanesidir. İlk jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin kurulmasından günümüze kadar geçen zamanda, teknolojiye gerçekleşen hızlı ilerleme sonucu, bu alandaki yeniliklerin ve araştırmaların sayısını arttırmıştır. Dünyadaki enerji tüketimi; sanayileşmeye, nüfus artışına ve teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli artmaktadır [2].

Jeotermal enerji sahaları rezervuar sıcaklığına göre; düşük sıcaklıklı jeotermal sahalar (20 °- 70°C), orta sıcaklıklı jeotermal sahalar (70 °-150°C), yüksek sıcaklıklı jeotermal sahalar (150°C' den yüksek) olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Düşük ve orta sıcaklıklı jeotermal sahalar, bu zamandaki teknolojik ve ekonomik koşullar altında ısıtma olmak üzere (sera, bina, zirai kullanımlar), endüstride (yiyecek kurutulması, kerestecilik, kâğıt ve dokuma sanayisinde, dericilikte, soğutma tesislerinde), kimyasal madde üretiminde (borik asit, amonyum bikarbonat, ağır su, akışkandaki CO₂'den kuru buz elde edilmesinde) kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, orta sıcaklıklı jeotermal sahalardaki akışkanlardan da elektrik üretimi için teknolojiler geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Yüksek sıcaklıklı jeotermal sahalardan elde edilen akışkan ise, elektrik üretiminin yanında diğer alanlarda da kullanılmaktadır [3].

Elektrik enerjisi günümüzün en büyük ihtiyaçları arasında yer almaktadır. Gelişen teknoloji ve artan elektronik cihazlar elektrik tüketimini her geçen gün daha da arttırmaktadır. Günümüzde elektrik üretimi için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin büyük bir kısmı termik santrallerde kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılıp enerjisinin bir akışkana aktarılarak, elde edilen buharın türbine hareket vermesiyle gerçekleşmektedir [1].

Ülkemiz jeotermal enerji kaynakları rezervlerin bakımından dünya genelinde 5. sırada, Avrupa da ise 1. sırada yer almaktadır. Ancak bu kaynakların büyük bir kısmı orta sıcaklıktadır (80-150°C). Bu orta sıcaklıklı kaynaklar uzun yıllar boyunca, sadece proses ısıtması, kurutma vb. işlemlerde kullanılmıştır. Fakat gelişen teknoloji bize bu kaynaklardan elektrik üretiminin de mümkün olduğunu göstermektedir. Günümüzde Organik Rankine çevrimi prensibine göre çalışan elektrik santralleri düşük sıcaklıklardaki kaynaklardan elektrik üretmek için ortaya çıkmıştır. Bu çevrimde ısı kaynağı olarak jeotermal kaynaklar kullanıldığında, ikili (binary) çevrim adını almaktadır. Bu sistem jeotermal kaynakların daha çok kullanılması açısından önemli bir yere sahiptir. ORÇ güç santralleri jeotermal sudan sonra ikinci bir çalışma akışkanı kullanılması nedeniyle binary güç santralleri kapsamındadır. Bu sistemler boyut olarak küçük sistemlerdir, çevreye ve insan sağlığına zararlı karbonmonooksit,

karbondioksit gibi egsoz gazları ve atmosfer kirletici madde salınımı yapmazlar [1,36].

Ülkemizdeki jeotermal sahaların yaklaşık olarak % 95'inin düşük ve orta entalpili olması, düşük sıcaklıktaki jeotermal akışkanlardan elektrik üretimine olanak sağlayan yeni teknolojilerin kullanımı üzerinde araştırma yapmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu teknolojilerde, ikinci bir akışkan kullanılmakta olup Organik Rankine (ORÇ) ve Kalina çevrimleri bu sistemlerin en güzel örneklerindedir [4].

Organik Rankine Çevrimli (ORÇ) santraller düşük ve orta sıcaklıklı ısının elektriğe dönüştürülmesi açısından umut vadeden sistemlerdir. ORÇ sistemi "Clausius-Rankine" güç santralleri gibi çalışır; fakat su yerine organik çalışma akışkanı kullanılır [4]. Kaynama noktası düşük olmasından dolayı ORÇ' deki kritik nokta basınç ve sıcaklık değerleri Clausius-Rankine' e göre daha düşüktür. Sistemin düşük ısı kaynaklarında çalışması, bu kaynakların ısısını kullanmayı avantaj haline getirmir. Ancak Clausius Rankine Çevrimine göre sistemin verimi oldukça düşüktür [5].

Clausius Rankine çevrimi, ısı enerjisini işe çeviren termodinamik bir döngü olup bu çevrimde iş yapan akışkan olarak devamlı su kullanılmaktadır. Rankine çevriminde geleneksel akışkan olan su, orta ve büyük güç santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için tercih edilmektedir. İş yapan akışkan olan su; güvenli, çevreci ve yüksek ısı transferi özelliklerinden dolayı tercih edilir. Ancak yüksek derecede korozif olması ve donma sıcaklığının yüksek olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [5]. Son zamanlarda Rankine çevriminde su yerine, sudan daha yüksek moleküler kütlesi olan hidrokarbon bileşenli organik akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu akışkanların kullanılması ile bu sistemler Organik Rankine Çevrimi adını almıştır. Biyokütle, güneş enerjisi, atık ısı geri kazanımlı, jeotermal enerji gibi uygulamalarda yaygın enerji üretim prosesleri arasına girmiştir. Son zamanlarda iklim değişikliği nedeniyle meydana gelen çevresel sorunlar ve artış gösteren petrol fiyatları, atık ısı veya ısı geri kazanımıyla Organik Rankine çevriminin elektrik üretiminde temiz ve güvenilir olduğunu göstermektedir [6].

ORÇ (Organik Rankine Çevrimi) temel prensipleri Rankine çevriminin prensipleri ile benzer durumdadır. Aralarındaki temel fark; Organik Rankine Çevrimindeki organik çalışma akışkanı, rankine çevrimindeki çalışma akışkanı olan sudan daha düşük bir kaynama noktası ve daha yüksek bir buhar basıncına sahip olmasıdır. Bu temel fark çevrimin verimini artırdığından dolayı seçilecek çalışma akışkanının kaynama noktası ne kadar düşük, buhar basıncı ise ne kadar yüksek olursa türbinden elde edilen enerjide o kadar fazla olur [6].

İkincil çevrim sistemlerinde, jeotermal akışkan kuyu başındaki basıncın yüksek tutulmasıyla tercihen % 100 sıvı olarak üretilir. Bu durumun sebebi; pompaların genelde sıvı faz için tasarlanmış olması ve akışkan akışı için gerekli olan pompa gücünün sıvı fazındayken daha düşük olmasıdır [7]. Jeotermal akışkan bir ısı değiştiricisinden geçirilir. Jeotermal akışkanın ısı enerjisi ısı değiştiricisine diğer uçtan gelen ikincil akışkana transfer edilir. Jeotermal akışkan ısı değiştiricisini düşük sıcaklıkta terk eder ve geri basılır. İkincil akışkan ısı değiştiricisinde ısınır, tamamen buharlaşır ve ısı değiştiricisini doymuş buhar veya hafifçe kızmış buhar olarak terk eder. İkincil akışkan türbinden geçer ve ısı enerjisi dönen mil mekanik güce dönüşür. Türbinin mili jeneratörün milini çevirerek mekanik gücün elektriğe dönüşmesini sağlar. Türbini düşük sıcaklıkta ve basınçta terk eden ikincil akışkan kondenserde yoğuşturulur. Daha sonra bir pompa yardımıyla basıncı tekrar ısı değiştiricisi basıncına yükselttilerek yönlendirilir. Bu şekilde ikincil akışkan termodinamik anlamıyla bir çevrimi tamamlamış olur. İkincil akışkanın tamamladığı bu çevrim aslında Rankine çevrimdir, jeotermal akışkanın bu santraldeki görevi Rankine çevrimine ısı kaynak oluşturmaktır. İkincil akışkanın termodinamik özellikleri jeotermal çevrimlerin performanslarını etkiler. Bu yüzden, belli bir jeotermal kaynaktan en fazla gücün üretilebilmesi için uygun ikincil akışkanın seçilmesi gerekir [7].

Bu çalışmamızda, düşük sıcaklığa sahip ($<150^{\circ}\text{C}$) atık ısı kaynaklı Organik Rankine Çevrimi prensibine göre çalışan bir sistemin tasarımı ve imalatı yapılarak güç üretimi elde etmeye çalışılmıştır. Ayrıca tasarlanan bu sistemde R-134a ve R-22 çalışma akışkanlarını kullanarak deneysel çalışma ile sistemin performans ve verim analizi

yapılmıştır. Bu çalışma, enerjinin az olduğu günümüzde önemli avantajlar ve olanaklar sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Arslan, çalışmasında, Simav'da kurulması düşünülen entegre sistem için öncelikli olarak elektrik üretimini incelemiştir. ORÇ-Binary ve Kalina çevrimleri ile çalışan santral dizaynları yapılmış, bu çevrimlerde farklı ikincil akışkanların kullanılması durumları da ele alınmıştır. Elektrik üretimi sonrası açığa çıkan atık ısının, öncesinde konut ısıtması, daha sonra sera ısıtmasında değerlendirileceği kabulüyle bölgesel ısıtma sistemi kurulmuştur. Sera ısıtması sonrası atık ısı ise balneolojik amaçlı kullanım için kaplıcada değerlendirme yapılmıştır. Kurulan entegre sistemin çalışma koşulları için 21 farklı model oluşturulmuştur. Enerji, ekserji ve maliyet analizleri dikkate alınarak optimum çalışma koşullarına sahip sistem modeli belirlenmiştir. ORÇ-Binary çevrimli güç santrali maksimum ekserji verimi Model A21 için elde edilmiştir. Bu modelde, geri ödeme süresi yaklaşık olarak 3,5 yıl olup, sistemin getirisi yaklaşık 635 milyon YTL'dir. Maliyet verimliliği açısından değerlendirildiğinde ise, optimum tasarım Model C31 için elde edilmiş olup sistemin getirisi yaklaşık olarak 866 milyon YTL, geri ödeme süresi ise yaklaşık 2 yıl olarak belirlenmiştir. Kalına çevrimli durum için optimum tasarım, ekserjitik açıdan Model B31, ekonomik açıdan ise Model C31'de elde edilmiştir [3].

Cihan, yapmış olduğu çalışmada, atık ısı kaynaklı çalışan ORÇ ile klasik buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin birleştirildiği bir sistem kurmuş ve termodinamik açıdan incelemiştir. Kurduğu sistemde, aynı anda hem soğutma işi yapan hem de güç üretebilen akışkan olarak, R600, R600a ve R601 kuru tip organik akışkanlarını seçmiştir. Seçilen bu kuru tip organik akışkanlara göre; sistemin güç çevrimini, soğutma çevrimini ve toplam çevrim verimlerini ayrı ayrı hesaplamıştır. Sistemin performansını etkileyen parametreleri teorik olarak araştırmış ve bu akışkanların ORÇ sisteminde yaygın olarak kullanılan R245fa akışkanı ile karşılaştırılmasını yapmıştır. Türbinin giriş-çıkış basınç oranları ve boyut faktörü dikkate alındığında

türbin için en küçük boyut, ağırlığı ve maliyetinden dolayı R600a akışkanı olarak ön plana çıkmıştır. Ancak elde edilen tüm bulgular sonucunda sistem performansı açısından en ideal akışkan R601 olarak tespit etmiştir [6].

Kara ve Yüksel, sıvı-sıvı kaynaklı ısı pompası üzerine yaptıkları çalışmada, R-22 ikincil akışkanını kullanarak tabandan ısıtma sistemiyle düşük sıcaklıklı jeotermal kaynakların ısıtma amaçlı kullanımını inceleyip 2,8'lik bir performans katsayısı elde etmişlerdir [8].

Kayabaşı, bu çalışmada; termoelektrik parça yardımıyla, ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren termoelektrik jeneratör uygulamasını yapmıştır. Verimleri çok düşük olarak bilinen bu parçalar, seri şekilde bağlanarak ısı değiştirici arasına yerleştirilmesiyle kullanım için gerekli olan voltajlara ulaşılmıştır. Termoelektrik jeneratör içerisinde sekiz parça kullanılmıştır. Termoelektrik parçanın bir yüzeyi jeotermal enerji ile ısıtılmış, diğer yüzeyi şebeke suyu ile soğutulmuştur. Elde edilen sıcaklık farkı ile elektrik enerjisi üretilmiştir. Üretilen elektrik enerjisi ile bataryalar şarj edilmiş ve LED'ler ile aydınlatma işlemi yapılmıştır. Termal tesiste yapılan deneylerde bilgisayar kontrollü gerilim, akım ve sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Yapılan deney verileri izlenmiş bataryanın şarj olduğu ve LED'lerle aydınlatma gerçekleştiği incelenmiştir. Kullanılan parça sayısı artırılarak, temiz şekilde ve kolay elde edilebilen jeotermal enerjinin bulunduğu her yerde bu sistemin elektrik enerjisine dönüştürülmesi mümkündür [9].

Dipippo, yaptığı çalışma düşük sıcaklıklı jeotermal akışkandan elektrik üreten binary santrallerin ikinci yasa değerlendirmesini yapmıştır. Bu araştırmaya göre, jeotermal binary güç santralleri, ısının işe çevrilmesinde nispeten zayıftır. Bu santrallerin birinci yasa veya ısıl verimi genellikle %8-12 aralığında değişim göstermektedir. Güç çıktısında %1-2 puanlık iyileşme, etkinlikte %10-20 bir kazanca dönüşmektedir. Bu sonuç, binary santrallerinde kullanılan akışkan düşük sıcaklıkta ve ekserjide olsa dahi yüksek ikinci yasa veya ekserjitik etkinlik ile çalışabileceğini göstermektedir. İkinci yasa değerlendirmesi yapılan binary güç santrallerinin bazılarında %40 daha fazla ekserjitik verim elde edilmiştir [10].

Saleh vd., termodinamik bir tarama ile 31 saf bileşeni Organik Rankine Çevriminde aracı akışkan olarak “backone durum denklemini” kullanıp araştırmışlardır. Bu akışkanlar arasında sıvılar, alkanlar, florlu alkanlar, eterler ve florlu eterlerin olduğunu belirtmişlerdir. Bu akışkanların farklı türdeki çevrimler için ısı verimlerini incelemişlerdir. Yüksek kaynama sıcaklığına sahip n - bütan için ısı veriminin % 13 ile maksimum değerde olduğu sonucunu elde etmişlerdir [11].

Schuster vd., yaptıkları çalışmada Organik Rankine Çevriminin gerçekleştirilmesinde organik çevrim akışkanının kullanımının güç üretiminde umut verici bir çözüm olduğunu, buna bağlı olarak düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından yararlanılabileceğini belirtmişlerdir. Böylece elektrik üretim maliyetinin düşürebileceğini göz önüne alarak, ORÇ uygulamalarının, çevresel koşullarda deneysel verilerini kullanarak simülasyonunu yapmışlardır. Ayrıca farklı sistemler için kullanımını tartışmışlar, verim ve maliyet gibi temel parametreleri belirlemişlerdir [12].

Yari, çalışmasında, yüksek sıcaklığa sahip jeotermal kaynaklar için çeşitli jeotermal güç santralleri tasarımları yapmıştır. Güç üretiminde en uygun çevrimi bulabilmek için bu santrallerin birbirleriyle olan karşılaştırmalarını ekserji analizine göre yapmıştır. Binary jeotermal güç santralinde; tek flaşlı çevrim, çift flaşlı çevrim, Organik Rankine çevrimi, Organik Rankine çevrimine iç ısı değiştiricisi ilave edilmesi, iç ısı değiştiricili rejeneratörlü Rankine çevrimi ve kombine flaş – çift akışkanlı çevrimler olarak ele almıştır. Her bir çevrim ile ilgili olarak bir termodinamik model geliştirmiştir. Bu çevrimlerin performansını, ikinci yasa verimi, ekserji kayıp oranı ve birinci yasa verimleri yönünden tartışmıştır. Çevrimdeki aracı akışkanı R123 olan ısı değiştiricili Organik Rankine Çevriminin birinci yasa verimini maksimum % 7,65 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık çevrimdeki ikincil akışkanı R123 olan ısı değiştiricili Organik Rankine çevriminde enerji girişine dayanan birinci yasa analizi en yüksek % 15,35 olarak bulmuştur [13].

Kökçe, tarafından yapılan tez çalışmasında, jeotermal enerji üretiminde kullanılan çevrimlerden kısaca bahsedilmiş, bu çevrimlerden biri olan ikili (binary) çevrimli jeotermal bir santralin termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa göre enerji ve ekserji hesaplamalarını yapmıştır. İncelenen jeotermal santral Aydın ilindeki

Salavatlı Dora-1 jeotermal güç santralidir. Organik akışkan olarak n-Pentane kullanılan santral için, farklı bir akışkan (izopentane) kullanılması durumundaki performansı incelenmiştir. Santralin enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve kayıpların nerelerde gerçekleştiği belirtilmiştir. Santralde en fazla ekserji kayıpları, jeotermal akışkanın reenjeksiyon yapılmasında ve yoğunlaştırucularda meydana geldiği hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, n-Pentane akışkanı için sistemdeki en büyük ekserji kaybının yoğunlaştırucuda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca organik akışkanın izopentane olması durumunda sistemin veriminin arttığını gözlemlenmiştir [14].

Aydın, bu çalışmada mevcut bir termik santrale buharlaştırılmalı yoğunlaştırucu ve Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ekleyerek, yapılan değişikliklerin santralin enerji ve ekserji verimlerine olan etkisini incelemiştir. Çeşitli tasarım kriterleri ile sistemde bazı değişiklikler önerilmiştir. Önerilen santral tasarımı göz önüne alınarak, sistemin ve sistem elemanlarının enerji- ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizlerde, Organik Rankine Çevriminde çalışma akışkanı olarak R141b, R123 ve R113 soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Yapılan değişikliklerle birlikte sistemde en yüksek ikinci tersinmezliğe sahip olan türbin, tasarlanan yeni sistemin mevcut sisteme oranla ORÇ’ de kullanılan çalışma akışkanları R141b, R123 ve R113 için sırasıyla, % 44,6, % 44,7 ve % 44,9 oranlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Her üç akışkan için sistem genelinde enerji ve ekserji verimlerindeki artış % 0.05’i geçmemiştir. Sonuç olarak santralin mevcut haline eklenecek olan buharlaştırılmalı yoğunlaştırucu ve Organik Rankine Çevriminin, sistemin verim artışında ihmal edilebilecek bir katkı sağladığı tespit edilmiştir [15].

Tchanche vd., yaptıkları çalışmada, ORÇ sistemlerinde düşük sıcaklıktaki ısı enerjisinin güce dönüştürülmesi için uygun organik akışkan seçimini teorik olarak incelemişlerdir. Yaklaşık 20 akışkan üzerinde karşılaştırmalı hesaplamalar yapmışlardır. Hesaplamalar sonucunda küçük ölçekli solar uygulamalarda en uygun akışkanın R134a olduğunu ve daha yüksek verim elde edilebileceğini saptamışlardır. Bunun yanı sıra R152a, R600, R600a ve R290 gazlarının da yüksek performanslı olduğunu ancak bu gazlar kullanılırken yanıcı olabilmesi durumunda tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmişlerdir [16].

Coşkun, bu çalışmada, jeotermal enerji kaynaklı on üç farklı kombinasyonda çoklu kullanım sistemlerinin termodinamik modellenmesi ve analizi gerçekleştirmiştir. Uygulamalar ana hatlarıyla dört grup altında incelenmiştir. Bu gruplar sırasıyla; (i) ısıtma dönemi için uygulamalar, (ii) soğutma dönemi için uygulamalar, (iii) elektrik üretimi birleşik sistemler ve (iv) elektrik üretimi hariç sistemlerdir. Bu çalışmada literatüre katkı sağlaması düşünülen üç yeni ekserjetik parametre de verilmektedir. Bunlar da sırasıyla: Toplam ekserji yıkım oranı, sistem elemanları ekserji yıkım oranı ve boyutsuz ekserji yıkım oranıdır. Bu çalışmada her bir sistem elemanı ve toplamda oluşan iyileştirilebilirlik potansiyelleri hesaplanmıştır. Çalışma sırasında her bir enerji sistemi için detaylı iş akış grafikleri ve tablolar oluşturulmuştur [17].

Kanoglu ve Bolatturk, çalışmalarında, ikili akışkan jeotermal güç santrali için gerçek verileri kullanarak performans ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında enerji ve ekserji akış diyagramlarıyla sistemin işleyişi gösterilmiştir. En yüksek ekserji kayıplarının reenjeksiyon bölümünde, ısı eşanjörlerinde ve yoğunlaştırıcı ünitesinde olduğunu tespit etmişlerdir.. 27 MWe kapasiteli binary çevrim jeotermal güç santralinin eşanjör girişi temel alındığında enerji verimini %4.5, ekserji verimini ise %21.7 olarak bulunmuştur. Organik rankine çevrimin ısı ve ekserji girişi temel alındığında ise enerji verimi %10.2, ekserji verimi %33.5 olarak bulunmuştur. Çalışmada, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı, kondenser basıncı gibi parametrelerin; enerji ve ekserji verimlerine, net güce ve jeotermal akışkanın reenjeksiyon sıcaklığına olan etkileri saptanmıştır [18].

Kanoğlu ve Çengel, çalışmalarında, jeotermal enerji ile güç üretimi, ısıtma ve soğutma yapan sistemlerin ekonomik açıdan değerlendirmesini yapmışlardır. Tipik bir jeotermal kaynağın ekonomik analizi sonucu, jeotermal ısıtmadan veya soğutmadan potansiyel kazanç tek başına güç üretiminden daha fazla olabilmektedir. Tek başına güç üretimiyle karşılaştırıldığında jeotermal ısıtmada 3,1, jeotermal soğutmada 2,9 kat daha fazla kazanç sağlanabilmektedir. Aynı şekilde tek başına güç üretimiyle karşılaştırıldığında birleşik güç üretimi ve ısıtma uygulaması 2,1 kat, birleşik güç üretimi ve soğutma 1,2 kat daha kazançlıdır. Yapılan çalışmada maliyet ve geri ödeme periyodu düşünüldüğünde güç üretiminin daha avantajlı olduğu açıklanmıştır [19].

Sun ve Li, çalışmalarında R-134a' yı iş akışkanı olarak kullanan bir ORÇ ısı geri kazanım santralini detaylı olarak incelemişlerdir. Santralin performansını değerlendirmek ve optimize için evaporatör, genişletici, hava soğutmalı kondenser ve pompa için matematik modeller geliştirmişlerdir. Optimizasyon sonuçları kontrollü değişkenler (optimal iş akışkan debisi, optimal kondenser fan debisi) ve kontrolsüz değişkenler (ısı kaynağı sıcaklığı ve ortam kuru termometre sıcaklığı) arasında net güç üretimi için lineer bir fonksiyon, ısıl verim için ikinci dereceden bir fonksiyon ilişkisine değinmişlerdir. Termal verim ve net güç üretiminde iş akışkanı debisinin, kondenser fanı hava debisinden daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir [20].

Roy vd., yaptıkları çalışmada, enerji üretimi için ORÇ' ne dayalı bir atık ısı geri kazanım sisteminin parametrik optimizasyon ve performans analizlerini R-12, R-123 ve R-134a çalışma akışkanlarını kullanarak incelemişlerdir. Seçilen sıvılar için türbin giriş basıncını, maksimum çalışma ve verimlilik optimizasyonu sisteminin doymuş buhar hattı boyunca ve izobarik farklı basınçlarda aşırı ısıtma ile yapmışlardır. Sonuçta; seçilen tüm sıvılar arasında maksimum iş çıkışı ve verimini R-123 akışkanı göstermiştir. Bu nedenle düşük dereceli ısı kaynaklarında iş akışkanı olarak R-123 kullanılması ORÇ' nde enerji üretimi için iyi bir seçenek olarak görmüşlerdir [21].

Önal, yaptığı tez çalışmasında, Engineering Equation Solver (EES) programı kullanarak düşük sıcaklıklardaki (72,6°C) endüstriyel atıklardan ısı geri kazanımı yardımıyla elektrik üretimi için organik rankine çevrimine dayalı üç farklı çevrim tasarlamıştır. Tasarlanan çevrimler basit organik rankine çevrimi, rejeneratif (geliştirilmiş) organik rankine çevrimi ve organik rankine çevrimli kojenerasyon sistemidir. Tasarlanan her üç sistemde atık akışkan giriş sıcaklığı ve akışkan debisi sabit alınmıştır. Organik iş akışkanı olarak izopentan, izobütan, R134a, R123, R245fa, R22, R13, propan ve R600 akışkanları incelenmiştir. Optimum akışkanı belirlemek amacıyla tasarlanan sistemlerde her akışkan için birinci ve ikinci kanun analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda farklı çevrim tiplerine ve basınç aralıklarına göre çalışacak optimum akışkanlar tespit edilmiştir [22].

Huijuan ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, düşük değerli ısı kaynağından elektrik üretimi için çalışma akışkanı organik bir akışkan olan Organik Rankine Çevrimlerini (ORÇ) ve bu çevrim için aracı akışkan olabilecek 35 adet akışkanı incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucu, çalışma akışkanının çevrim performansı üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Yapılan bu çalışmada, kuru ve izentropik akışkanların ORÇ sistemleri için daha çok tercih edildiğini göstermektedir. T-s diyagramında doyma eğrisi pozitif eğimli ise kuru akışkan, negatif eğimli ise izentropik akışkan olarak tanımlanmaktadır [23].

Eyidoğan vd. yaptıkları çalışmada, orman ürünlerinden elde edilen biyokütle kaynaklı bir ORÇ sisteminin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Gerçek sistem verileri kullanılarak yaptıkları çalışmada, ORÇ ünitesinin kaynak sıcaklığı olarak biyokütle esaslı sıcak yağ kazanı kullanmışlardır. ORÇ sisteminin temel ekipmanları olan evaporatör, kondenser, türbin ve kondanserde iki farklı çalışma koşuluna göre enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında, kondanser basıncının enerji ve ekserji verimlerine etkilerini de incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, birinci çalışma koşuluna göre, enerji verimini % 12,59 ekserji verimini ise % 33,26, ikinci test çalışma koşuluna göre ise enerji verimini % 13,22 ekserji verimini % 35,5 ve üçüncü test çalışmasında ORÇ ünitesinin enerji verimi % 12,91, ekserji verimi % 33,8 olarak bulmuşlardır. Ekserji yıkımının sistem ekipmanları içerisindeki dağılımı ise büyükten küçüğe doğru, evaporatör, kondenser, türbin, rejeneratör ve pompa olarak belirlenmiştir [24].

Gang vd., düşük sıcaklıklı rejeneratif organik rankine çevriminden elektrik üretimi üzerine analizler yapmışlardır. Temel olarak yoğunlaşma oranı düşük parabolik yoğunlaştırıcı ile düşük sıcaklıklı rejeneratif ORÇ sistemini tasarlamışlardır. Kolektördeki rejeneratif döngünün ORÇ üzerindeki etkileri ve elektrik üretim verimliliği analiz edilmiştir. Bunun sonucunda kolektörlerin ortalama sıcaklığının artışı ile rejeneratif döngünün ORÇ verimliliği üzerinde olumlu etkilerinin olduğu fakat kolektör verimliliğinde olumsuz etkilerin olduğu belirlenmiştir. Rejeneratif organik rankine çevriminin elektrik üretim verimi, 750 W/m² ışıma için yaklaşık %8,6 civarında iken rejeneratif döngüsü olmayan sistemin verimi ise %4,9 olarak hesaplanmıştır [25].

Sanchez vd., yüksek sıcaklıktaki yakıt hücresi temeline dayanan gaz türbini ve ORÇ' ye dayanan bileşik sistemin analizini yapmışlardır. Sistemde yakıt pili atmosferik basınç altında çalışsa bile, % 60 verim elde etmenin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Analizin ilk bölümü ORÇ akışkan seçimi üzerinedir. Termodinamik optimizasyondan sonra R245'in performans açısından en verimli akışkan olduğu saptanmıştır. Bu sıvı bileşik sistemde kullanıldığında, uygun çalışma koşulları altında %60 sistem verimliliğine ulaşır. Çalışma, sistem içinde hidrokarbonların kullanımının güvenlikle ilgili yanları hakkında bir değerlendirme ile son bulmuştur [26].

Köse, çalışmasında jeotermal enerjinin güç üretimindeki kullanımını ve Kütahya-Simav bölgesindeki elektrik üretimi için jeotermal enerji kaynaklarının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Binary çevriminin düşük sıcaklık ve sıvı yüzdesi yüksek jeotermal akışkanların kullanılacağını, ikincil akışkan olarak R-134a'nın kullanılmasının daha uygun olacağını ifade etmiştir. Bu kaynak için tasarlanan güç santralinin ısıl verimi %12.93 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda, Simav bölgesindeki jeotermal akışkanın sıcaklığının bölgesel ısıtma için oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Jeotermal akışkanın enerjisini etkili bir şekilde kullanmak için bir kompleks kurulabileceğine ulaşılmıştır. Bu kompleks ile, jeotermal enerjinin %12.93'ü elektrik enerjisinde, geri kalanı ise (%87.07) Simav'ın ısıtılması, endüstriyel amaçlar, seralar ve termal turizmde kullanılabileceği savunulmuştur [27].

Dağdas vd., yaptıkları çalışmada, Denizli-Kızıldere jeotermal güç santralının gerçek verilerini kullanarak, santralin termodinamik optimizasyonunu yapmışlardır. Optimum flaşlama basıncı 200 kPa olarak bulunmuştur. Mevcut santral yerine ikili çevrim uygulamasıyla optimum basınç oranının 200 kPa değerinde % 18 oranında güç artışı sağladığı ve izobütanın en iyi aracı akışkan olduğu saptanmıştır. Ek olarak yeni bir flas-binary modeli önerilmiştir. Bu modelde maksimum güç 18.238 MWe olarak hesaplanmıştır. Bu model mevcut santralin gücüne kıyasla %93.2 oranında artış göstermiştir [28].

Yılmaz vd., yaptıkları çalışmada güneş çanaklı Organik Rankine Çevriminin enerji ve ekserji analizleri incelenmiş, bu çevrimde akışkan olarak R410a kullanılmıştır.

Zararlı çevresel etkilerin olmaması, basınç ve sıcaklık değerlerinin yüksek olması ve literatürde çok fazla çalışma bulunmamasından kaynaklı R410a akışkanı seçilmiştir. Hesaplamalar Isparta'nın güneş enerjisi verilerine göre yapılmıştır. Sistemin türbin giriş basıncı ve kazan sıcaklığına göre verimleri incelenmiştir. Güneş enerjili çanak sisteminde kazana gelen güneş enerjisinin kazandaki ısı transfer yağını ısıtması ve buradan ORÇ sisteminde dolaşan R410a' ya ısınıyı aktarması suretiyle türbine giren akışkanın sıcaklığı ve basıncı sağlanmıştır. Sonucunda türbin giriş basıncının ve kazan sıcaklığının artması sistemin ısı verimini ve ekserji verimini arttırmıştır. Çevrimin ısı verimi % 10, ekserjetik verimi ise % 70 olarak hesaplanmıştır [29].

Pelit, çalışmasında biyokütle kaynaklı ORÇ sisteminin termodinamik ve termoeconomik analizini yapmış, aynı zamanda biyokütle kaynaklarından ve ORÇ sistemlerinden teorik bahsetmiştir. Analiz için gerekli veriler ağaç sanayisinde entegre üretimi yapan işletmenin ORÇ sisteminden elde edilmiştir. ORÇ' nin ihtiyacı olan biyokütle kaynaklı termal ısı, kazanlardaki biyokütlenin yakılmasıyla elde edilen kızgın yağdan sağlanmaktadır. Biyokütle kaynaklı ORÇ sistemi mekân ısıtması, sıcak su ve elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Net elektrik üretimi 891,76 kW olan ORÇ sisteminin 24 saat çalıştığı düşünüldüğünde yıllık ortalama 7.811.818 kW elektirik üretimi yapılabilir. SPECO (özgül ekserji) metoduna göre yapılan termoeconomik analiz sonucunda üretilen elektriğin birim maliyeti 5,671 \$/GJ olarak hesaplanmıştır [30].

BÖLÜM 3

JEOTERMAL ENERJİ

Jeotermal kelimesi Yunanca jeo (yer) ve termal (ısı) kelimelerinden gelmektedir. Jeotermal enerji, yerkabuğunun farklı derinliklerinde yer alan ve yeryüzündeki havzalardan beslenen sularla birikmiş olup bünyesinde daha çok erimiş mineral tuzlar ve gazlar içeren su ve buhardan oluşan hidrotermal bir kütledir [31].

Yeraltındaki granit gibi bazı sert kayaların oluşturduğu sistemlerin bünyelerinde su bulunmamasına rağmen bir jeotermal enerji kaynağı olarak nitelendirilir. Bu kayalar bazı teknik yöntemlerle ısısından faydalanılan, yerin derinliklerindeki sıcak kuru kayalardır. Yerkabuğunda depolanan ısısal enerji, jeotermal enerjiyi oluşturmaktadır. Bu ısısal enerji yeraltındaki kayaç formasyonlarında, bu formasyonların gözeneklerinde ve çatlaklı yapılarındaki doğal akışkanlarda yer alır. Jeotermal enerji, fosil yakıtların tüketimi ve bunların kullanımıyla açığa çıkan asit yağmurları ve sera etkisi gibi çevre sorunlarının önlenmesi yönünden büyük önem taşımaktadır. Jeotermal enerji çevre açısından diğer enerji türlerine oranla çevreye zarar vermeyen, üretim maliyeti oldukça düşük, yatırımını kısa zamanda geri kazandıran bir enerji çeşididir [31].

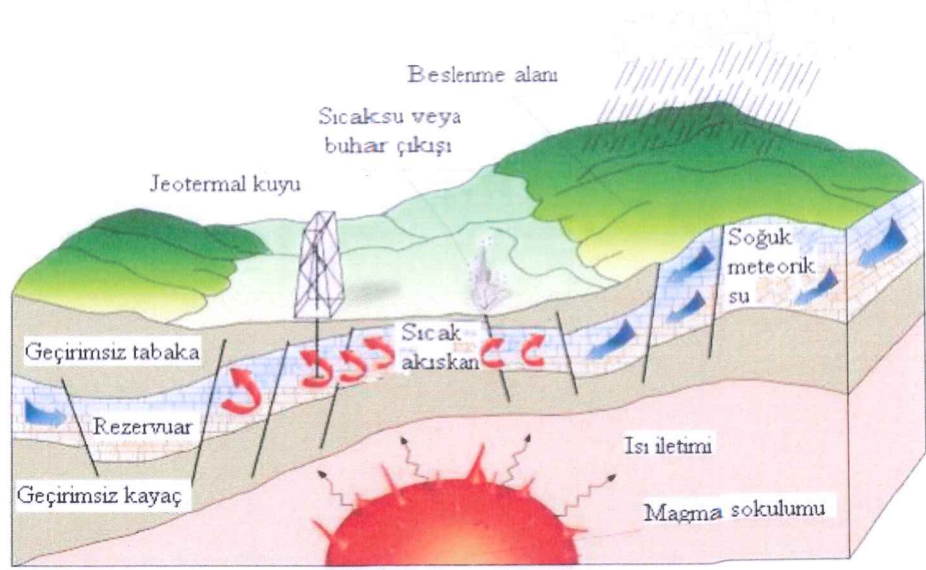
Jeotermal sistemler dinamik, açık ve değişken sistemlerdir. Bu nedenle, yerkabuğunun üst kısımlarında ısı akısının yüksek, yeraltı suyunun derinlere süzülüp ısıdıktan sonra yeniden yükselebileceği geçirimli zonların bulunduğu ve jeotermal akışkanların konveksiyon hücrelerini oluşturacak şekilde dolaşıp ısı biriktirebileceği kapanların olduğu kısımlarda bulunmaktadır [32].

Yerkürenin merkez kısmı çok sıcak olduğundan, ısı yüzeye doğru akmakta bu nedenle derine doğru inildikçe sıcaklık artış göstermektedir. Yerin merkezine doğru ortalama sıcaklık artışı 30°C/km'dir. Bu sıcaklık artışı termal olmayan bölgelerde

10°-40°C/km, semitermal bölgelerde 70°C/km ve hipotermal bölgelerde 70°C/km değerinden daha fazladır. Deprem kuşakları ve volkanik bölgelerde, yer kabuğunun zayıf noktalarında, yüzeye yakın kısımlara sokulmuş magmada sıcaklık değişimleri gözlenir. Ayrıca, yoğun radyoaktivite, sedimentasyon sırasında oluşan kimyevi tepkimelerde jeotermal sıcaklık değişiminin artış sebebi olabilir. Yerküre ısı kaynaklarının başlıcaları; yerküre içindeki radyoaktif maddelerin bozulması, ekzotermik kimyevi tepkimeler, yerküre büzülmesi, faylanmanın sebep olduğu sürtünme enerjisi, ergimiş kayaların soğuması ile meydana gelen kristal ve katılaşma gizli ısılarıdır. Jeotermal akışkanı meydana getiren sular, genellikle meteorik kökenli sular olduklarından yeraltındaki rezervuarlar sürekli beslenmekte ve kaynak yenilenebilmektedir. Bu nedenle pratikte beslenmenin üzerinde kullanma olmadıkça jeotermal kaynakların azalması mümkün değildir [33].

Jeotermal enerji hem düşük karbondioksit emisyon oranıyla hava kirliliği yaratmaması hem de yenilenebilir olması nedeniyle önemli bir alternatif enerji kaynağıdır. Güneş, rüzgâr, hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında jeotermal enerji kesintisiz olmasından dolayı daha avantajlı bir yapıya sahiptir. Bir jeotermal sistemin oluşabilmesi için gerekli olan parametreler; akışkanı bünyesinde barındıran rezervuar kayaç, yer kabuğunun derinliklerindeki ısı kaynağı, ısıyı taşıyan akışkan (beslenme) ve ısının kaybını önleyen örtü kayaçtır [34].

Dünyanın merkezinde sıcaklığı 4200 °C'ye ulaşan magma adı verilen eriyik kütle bulunmaktadır. Tektonizmanın yarattığı kırık ve zayıf zonlardan kabuk içerisinde sığ derinliklere veya yeryüzüne kadar ulaşan magma faaliyetleri jeotermal sistemin ısı kaynağını oluşturur. Yeryüzünden kırık ve çatlaklar boyunca süzülen meteorik sular derinlerde ısıdıktan sonra permeabilitesi ve gözenekli yapısı yüksek olan rezervuar kayaç içinde birikir. Bu suların bir kısmı fay hatları boyunca yükselerek yeryüzüne ulaşır jeotermal kaynakları oluştururlar. Üzeri geçirimsiz bir örtü kaya ile kuşatılan ve çoğu zaman yeryüzüne ulaşamayan rezervuar kaya içerisindeki jeotermal akışkan sondaj çalışmalarıyla yüzeye çıkarılır [34]. Jeotermal sistem, ısının yüksek olan kaynaktan düşük olan kaynağa taşınması şeklinde de tanımlanabilir. Şekil 3.1'de ideal bir jeotermal sistem şematik olarak gösterilmiştir [3].



Şekil 3.1. İdeal bir jeotermal sistemin şematik görünümü [35].

Yeraltındaki çatlak ve kırıklardan yeraltına doğru süzülerek ilerleyen suların toplandığı ve akifer görevi gören bölüme hazne kaya denir. Örtü kayacık, altındaki hazne kayacık gözenekleri içerisinde bulunan ısınmış suyun, sıcak vasıtasıyla ortaya çıkan gazların basıncı etkisiyle tekrar yeryüzüne doğru yükselmesine engel olarak suyun hazne kayacıkta kalmasını sağlar. Soğumakta olan magmatik kütle ise hazne kayacıkta suyun ısınmasına katkıda bulunmak için ısı kaynağı görevi görür. Isı (jeotermal enerji) çekirdekten dışa doğru çevresini ısıtarak açığa çıkar. Erimiş kayacık yüksek basınç ve sıcaklıkta, magma içinde dolaşır. Magma bazen lav şeklinde yüzeye çıkar, ancak çoğu zaman aşağıda kalır ve çevresindeki kayaları ısıtır. Sular çatlak veya gözenekli kayalardan sızarak yüzeyin altına doğru akar, buhar veya sıcak su depolarını oluşturur. Bu sular çok çeşitli uygulamalarda ve elektrik üretiminde kullanılabilir [35].

Jeotermal sistemler, sıcaklıkları bakımından üç grupta incelenir: [36]

- Düşük entalpili bölgeler: (20 - 70 °C) sıcaklığa sahip bölgeler.
- Orta entalpili bölgeler: (70 - 150 °C) sıcaklığa sahip bölgeler.
- Yüksek entalpili bölgeler: (150 °C)' den büyük sıcaklığa sahip bölgeler.

Jeotermal sistemler fiziksel yapı olarak ise üç grupta incelenir:

- Sıvı etkin sistemler: Bu sistemde rezervuardaki akışkan sıvı haldedir.
- İki fazlı akışkan etkin sistemler: Bu sistemde rezervuarda su ve su buharı beraber bulunmaktadır.
- Buhar etkin sistemler: Bu sistemde rezervuarda kızgın buhar bulunmaktadır.
- Şekil 3.2’de güç santrallerindeki çevresel etkilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü üzere, jeotermal enerji kaynaklarının diğer güç kaynaklarıyla karşılaştırılması sonucunda çevresel olarak çok temiz bir enerji kaynağı olduğu anlaşılmaktadır.

Santral Tipi	Hava kirliliği	İklimsel Etki	Doğal Görünüme Etkisi	Dışa Bağlılık	Kaynakların Sürekliliği	Kaynakların Tükenebilirliği	Teknolojik Risk
Nükleer	x	x	x	x	x	x	x
Petrol	x	x	x	x	x	x	o
Kömür	x	x	x	o	x	x	o
Doğalgaz	x	x	x	x	x	x	o
Hidrolik	o	x	x	o	x	o	o
Rüzgar	o	o	x	o	o	o	o
Güneş	o	o	x	o	o	o	o
Jeotermal*	o	o	x	o	x	o	o

*Re-enjeksiyon yapılması durumunda; x: var, o: yok.

Şekil 3.2. Güç santrallerinin karşılaştırılması.

Genel olarak; jeotermal enerji, fosil kaynaklı yakıtların tüketiminde ve bunların kullanımından oluşan sera etkisi ve asit yağmurları gibi çevre sorunlarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu durum öncelikle, jeotermal enerjinin çevre yönünden diğer enerji türlerine kıyasla sahip olduğu doğal üstünlüklerden kaynaklanmaktadır. Jeotermal enerjinin kullanımıyla ilgili olarak oluşabilecek çevre sorunlarının çözümü konusunda son zamanlarda önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu durum, jeotermal enerjinin çevre açısından önemini daha da arttırmıştır [5].

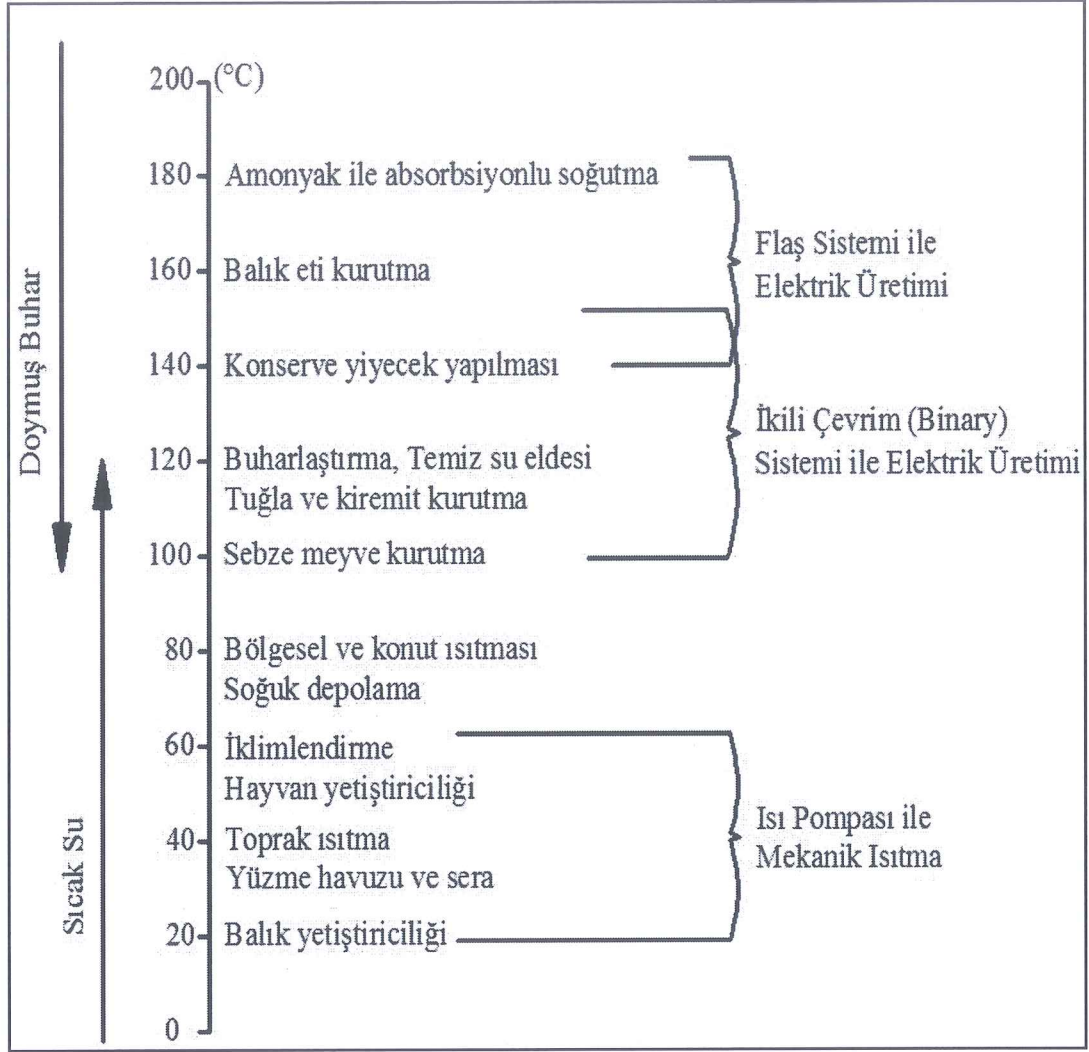
İnsan sağlığından tarıma, sanayiye, elektrik üretiminden ısıtmaya kadar geniş kullanım alanına sahip, içerisinde erimiş halde mineraller bulunduran bir enerji bileşimidir [37].

3.1. JEOTERMAL ENERJİ KULLANIM ALANLARI

Jeotermal kaynaklar genellikle içerdiği ısı enerjisi ve kimyasal maddeler sebebiyle değerlendirilirler. Bundan dolayı jeotermal enerjinin kullanım alanları oldukça yaygındır. Jeotermal enerjinin akışkan sıcaklığına göre başlıca faydalanılma alanları şunlardır:

1. Isı enerjisinin elektriğe dönüştürülmesinde,
2. Turistik tesislerde kullanımı, tedavi amaçlı kaplıca ve yüzme havuzlarında kullanımı,
3. Merkezi sistemle ısıtma ve soğutma işlemlerinde kullanımı (sera, toplu konut, kampüs vb. ısıtılması veya soğutulması),
4. Kimyasal madde üretiminde (tatlı su, mineral ve kimyasal tuz üretimi vb),
5. Isı enerjisiyle doğrudan endüstriyel amaçlı ısıtma ve kurutma alanlarında yararlanılması (şeker, tekstil, kâğıt, ilaç, konservecilik vb. ürünlerde),

Şekildeki 3.3'teki gibi değişik sıcaklıklardaki jeotermal akışkanların kullanım alanları özetlenmiştir [33].



Şekil 3.3. Jeotermal enerjinin sıcaklığına göre kullanım alanları (lindal diyagramı) [33].

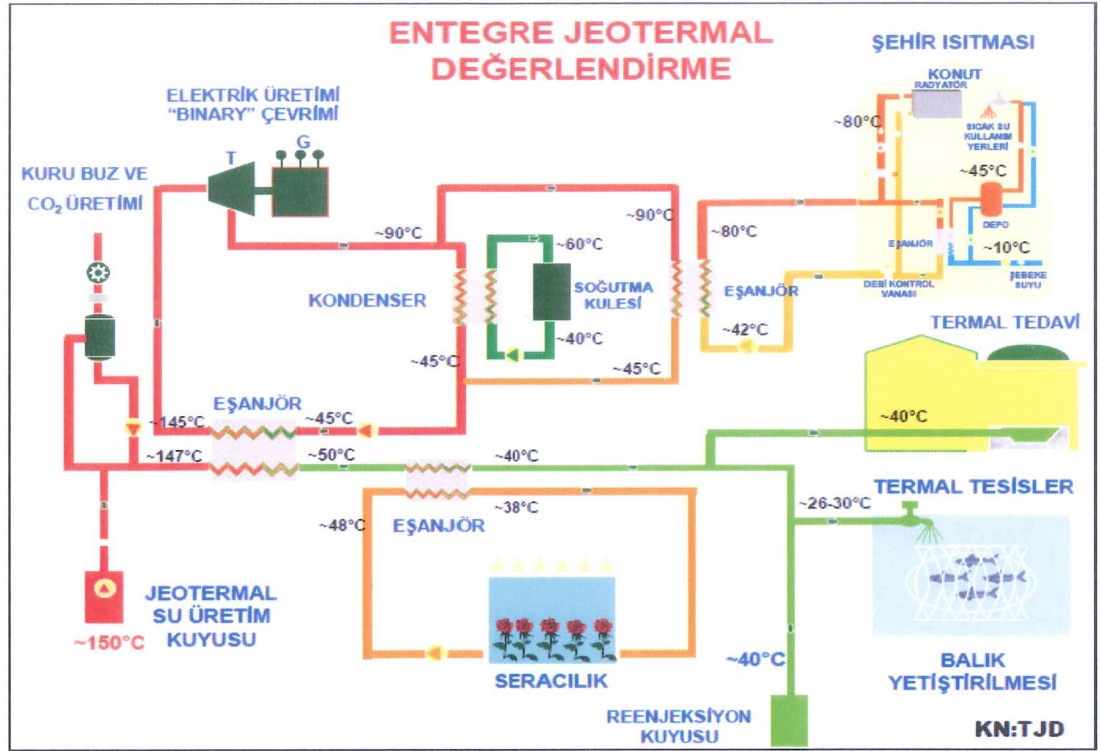
Lindal diyagramı, adını İzlandalı bir mühendis olan Baldur Lindal'dan almıştır. Bu diyagrama göre; tarım ve su ürünleri uygulamaları 25 ile 90 ° C arasında değişen düşük sıcaklıklar gerektirirken, hacim ısıtması için bu sıcaklık aralığı 50-100 ° C'dir. Soğutma ve endüstriyel prosesler için gerekli sıcaklık ise 100-110 ° C'nin üzerindedir [3].

Jeotermal enerjinin başlıca avantajları ise şunlardır:

1. Öncelikle, jeotermal enerjinin birden çok amaca aynı anda hizmet etmesi; çevresel ve ekonomik bakımdan önemli avantajların başında yer alır.

2. Jeotermal kaynaklar yeraltındaki rezervuarlar tarafından devamlı beslenmekte ve kullanılan jeotermal akışkanın yeraltına tekrar basılmasıyla (re-enjeksiyon) kaynak yenilenebilmektedir.
3. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre oldukça ekonomiktir. Doğal ve kendi kaynağımız olduğu için dışa bağımlı değildir, politik ilişkilerden etkilenmez. Büyük yatırımlar gerektirmeyip, yapılan yatırımı kısa sürede geri kazandırması ekonomik yararlılığının bir başka yönüdür.
4. İhtiyaç duyduğu düşük teknoloji seviyesi nedeniyle jeotermal enerjiye yapılacak yatırımı daha cazip kılmaktadır.
5. Jeotermal enerjinin kullanılması ile havaya karbon monoksit, azot oksitler ve kükürt oksitler gibi zararlı gaz salınımları yapılmamaktadır [33].
6. Son yıllarda geliştirilen “Binary Cycle” veya “Multi Flashing System” gibi teknolojik gelişmeler ile daha düşük sıcaklıktaki sahalardan da elektrik üretimi mümkün olmaktadır. Santral çevrim verimleri artırılarak birim enerji maliyeti daha düşük seviyelere inmektedir.
7. Elektrik üretimi ile entegre olarak geliştirilen sistemlerle jeotermal akışkandan daha fazla termal güç ve diğer kullanımları elde etmek mümkündür. Yani birden fazla amaçla aynı anda elektrik üretimi, daha sonra santraldan çıkan akışkandan ısı enerjisi, termal turizm, kimyasal madde eldesi gibi alanlarda kullanılmaktadır [31].

Jeotermal sistemlerde entegrasyon, jeotermal akışkanların çeşitli sıcaklık seviyelerine göre farklı alanlarda değerlendirilmesi, jeotermal yatırımları daha da ekonomik hale getirmektedir. Jeotermal enerjiden maksimum düzeyde yararlanmak ve akışkanın enerjisini en verimli şekilde kullanmak için, dış hava sıcaklığının ve uygulama yerinin ortam sıcaklığı iyi bilinmelidir [5]. Jeotermal kaynakların entegre şekilde 3.4’te kullanılması jeotermal yatırımları daha ekonomik bir hale getirmektedir [37].



Şekil 3.4. Entegre jeotermal uygulamalar [37].

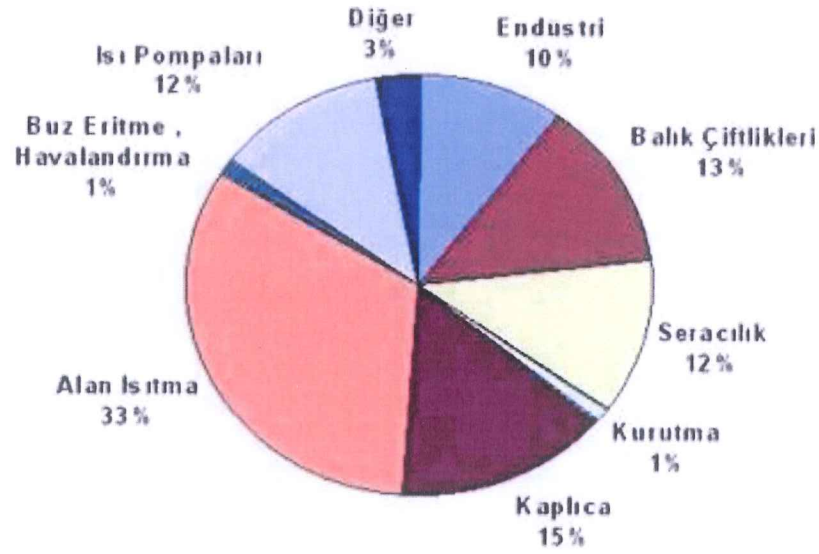
3.2. DÜNYADA JEOTERMAL ENERJİ

İlk çağlardan yakın geçmişe kadar sadece sağlık amacıyla kullanılan jeotermal kaynaklar günümüzde, ya doğrudan ısıtmada ya da başka enerji türlerine dönüştürülerek kullanılmaktadır. 20. yüzyılın başına kadar sağlık alanında ve yiyecekleri pişirme amacı ile yararlanılan jeotermal kaynakların kullanım alanları gelişen teknolojiyle günümüzde çok yaygınlaşmış ve çeşitlenmiştir.

Dünyadaki jeotermal enerji uygulamalarında düşük sıcaklıklı jeotermal akışkanlar doğrudan ısıtma işleminde kullanılmaktadır. Isı pompaları yardımıyla özellikle soğuk ülkelerde suyun sıcaklığı 5°C'ye düşünceye kadar akışkandan yararlanılabilmektedir. Fransa, İzlanda, Yeni Zelanda, Türkiye, Japonya, Rusya, Macaristan, Kanada gibi ülkelerde 40°C'den fazla sıcaklıktaki jeotermal akışkanlardan binaların merkezi ısıtmasında kullanılmaktadır [5, 42].

Seraların ısıtılması ile turfanda çiçekçilik, sebzeçilik, meyvecilik yapılmakta ve dünyadaki jeotermal enerjinin doğrudan kullanımının önemli bir kısmını

oluşturmaktadır. Macaristan, Türkiye, İtalya, ABD, Japonya, Doğu Avrupa Ülkeleri, Meksika, Yeni Zelanda ve İzlanda'da 30 °C' den fazla sıcaklıktaki akışkan kullanılarak seralar ısıtılır. Dünyada yaklaşık 27.500 MWt karşılığı jeotermal enerji bu amaçla kullanılmaktadır. Japonya, Filipinler, Çin ve İzlanda'da tropikal bitki, balık ve timsah yetiştiriciliği yapılmaktadır [38]. Japonya, ABD, Yeni Zelanda, Macaristan ve Rusya gibi ülkelerde tavuk ve hayvan çiftliklerinin ısıtılması jeotermal enerjiden sağlanmaktadır. Jeotermal kaynaklardan özellikle İzlanda ve Sibirya bölgesinde toprak, cadde ve havaalanı pistlerinin ısıtılmasında yararlanılmaktadır. İtalya, Japonya, ABD, İzlanda ve Türkiye'de termal tedavi, yüzme havuzu ve diğer turistik tesislerde de jeotermal enerjiden yararlanılmaktadır. Şekil 3.5'te dünyada jeotermal enerjinin elektrik dışı uygulamalarının dağılımı gösterilmiştir [5].



Şekil 3.5. Dünyada jeotermal enerjinin elektrik dışı uygulamaları.

Dünyada jeotermal akışkanın endüstriyel uygulamaları olarak, Japonya, ABD, İzlanda, Tayland'da yiyeceklerin kurutulması, sterilize edilmesi ve konservecilik alanında kullanılması verilebilir [37]. Endüstriyel uygulamalardan bazıları, kerestecilik, ağaç kaplama sanayi, boyacılıkta, derilerin kurutulması, kâğıt, dokuma, ve islenmesinde, bira ve benzeri endüstrilerde mayalama ve damıtmada, soğutma tesisleri ve beton blok kurutulması jeotermal enerjinin yaygın olarak kullanıldığı alanlara örnek olarak verilebilir. 200°C ve daha yüksek sıcaklıktaki jeotermal

kaynaklardan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda daha düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklardan da buharlaşma sıcaklığı düşük olan gazlar (freon, izobütan, vb.) kullanılarak, çeşitli çevrimler yardımıyla elektrik üretimi yapılmaktadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi ilk olarak 1904 yılında İtalya'da gerçekleşmiştir [5]. Dünya'da jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi en yüksek ülkeler Filipinler, Endonezya, ABD, İtalya ve Meksika'dır. Dünya jeotermal enerji kaynaklarının çoğu çift fazlı, sıvı yoğun ve içinde çözünmemiş gaz miktarı ile çökelmeye sebep olan karbonatlı bileşimler barındıran özelliktedir [31].

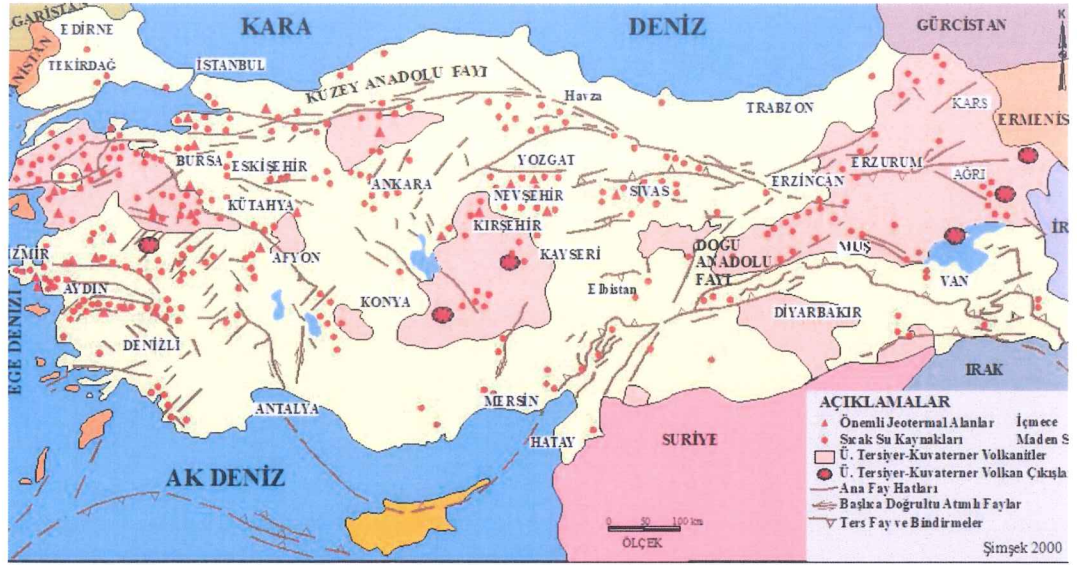
3.3. TÜRKİYEDE JEOTERMAL ENERJİ

Alp-Himalaya kuşağı içinde yer alan Türkiye, aktif faylar bakımından oldukça zengin konumdadır. Bu fay hatları boyunca ülkede fazlasıyla doğal sıcak su akışı mevcuttur. Yer kabuğunun farklı derinliklerinde uygun jeolojik şartlarda doğal olarak oluşan ve yeryüzüne kendiliğinden çıkan bu sular mineral, tuz ve çeşitli element özellikleri açısından farklılıklar göstermektedir. Oluşan bu kaynaklar sıcaklık ve kimyasal özelliklerine göre farklı şekillerde değerlendirilmektedir. Böylece dünya uygulamalarında jeotermal kaynakların kullanımı doğrudan ve dolaylı şekilde olmaktadır. Doğrudan kullanım alanları genellikle düşük (20°-70 °C) ve orta sıcaklıklı (70°-150 °C) sahalardaki kaynakların kullanılması şeklinde olmaktadır. Bu kaynaklar bölgesel ısıtma, mineral tuz eldesi, soğutma, tarımsal ürün kurutma, termal turizm ve endüstriyel sahalarda kullanılmaktadır [35]. Yüksek sıcaklıklı (>150°C) sahalardan ise elektrik elde etmek için faydalanılmaktadır. Türkiye'deki en yüksek jeotermal potansiyele Batı Anadolu Bölümü %79 oranla sahiptir. Onu İç Anadolu Bölgesi (% 8,5), Marmara Bölgesi (% 7,5), Doğu Anadolu Bölgesi (% 4,5) ve diğer bölgeler (% 0,5) oranla takip eder [39]. Türkiye'deki en yüksek sıcaklığa sahip jeotermal alanlardan bazıları şunlardır:

Çizelge 3.1. Türkiye’de elektrik üretimine uygun jeotermal sahalar.

Jeotermal Saha	Rezervuar Sıcaklığı (°C)
Denizli-Kızıldere	242
Aydın-Germencik	232
Manisa-Salihli-Göbekli	182
Çanakkale-Tuzla	174
Aydın-Salavatlı	171
Kütahya-Simav	162
İzmir-Seferihisar	153
Manisa-Salihli-Caferbeyli	150
Aydın-Yılmazköy	142
İzmir-Balçova	136
İzmir-Dikili	130

Türkiye’de jeotermal enerji araştırma ve geliştirme çalışmaları 1960’lar da MTA tarafından yürütülmeye başlamıştır. Bu tarihten günümüze kadar MTA jeotermale yönelik jeolojik, jeofizik, jeokimya ve sondaj çalışmaları yapmıştır. Sonucunda sıcaklığı 35 ° C’nin üzerinde olan 170 jeotermal sahanın varlığı tespit edilmiştir. Bu sahalardan 161 tanesi orta ve düşük sıcaklıklı olup, endüstriyel proses ısı kullanımına, ısıtma, ve kaplıca turizmüne uygundur. Batı bölgemizde bulunan diğer 9 jeotermal saha ise yüksek sıcaklıklı olup, yeni teknolojilerin kullanılması ile elektrik üretimine uygundur. Batı Anadolu’daki jeotermal sistemler genelde yüksek sıcaklığa sahip, açılma tektoniğine bağlı olarak grabenlerde yer alırlar [34]. Doğu-batı ve kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu genç grabenlerde yer alan jeotermal sistemlerin en önemlileri Menderes ve Gediz grabeni içinde gelişmiştir. Bu grabenleri oluşturan diri faylar hem jeotermal yönden hem de depremsellik yönünden aktif yapıdadırlar [42].



Şekil 3.6. Türkiye'deki genç tektonik hatlar ve sıcak su kaynaklarının dağılımı (MTA, 2012).

Jeotermal sistemli sahaların geliştiği ülkeler, tektonik ve aktif volkanik kuşaklar üzerinde yer almaktadır. Ülkemizde de genç tektonizma ve volkanizma yaygın olarak bulunmaktadır. Buna bağlı olarak gelişen sistemler yüksek jeotermal enerji potansiyeli oluşturmuştur. Aktif faylarla sınırlı grabenler ve yaygın genç volkanizmaya bağlı olarak gelişen doğal buharların ve sıcaklığı 25- 103 °C arasında değişen 600'ün üzerindeki sıcak su kaynağının varlığı, ülkemizin önemli bir jeotermal enerji potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [35]. Bu sıcak su kaynakları temel alınarak hesaplandığında rezervi 2420 MW 'dır. MTA 'nın yaptığı hesaplamalara göre ülkemizdeki olası potansiyel 31500 MW 'dır. Türkiye jeotermal enerjinin doğrudan kullanımını açısından 41 ülke arasında 7. sırada yer almaktadır [40].

Türkiye'de ilk jeotermal kaynaklı güç santrali 1983 yılında *Denizli-Kızıldere* sahasında 15 MW olarak çalışan tek buharlaştırmalı buhar türbini kurulmuştur. 6 adet kuyu ile çalışmaya başlayan santral, CaCO₃ kabuklaşması nedeniyle kısa süre içinde güç kaybetmiş ve ortalama 5 MW güçte üretim yapmıştır. Sisteme 3 yeni kuyu ilave edilerek 2010 yılına kadar ortalama 9 MW kapasitede çalıştırılmıştır. Santralin 150 °C olan atık suyu ile Sarayköy'de 2.500 konutun ısıtılması başlatılmıştır. Isıtma işlemini sağlayan şirket 6.85 MW'lık bir ORÇ (Organik Rankin Çevrimi) santralini sisteme entegre ederek 2007 yılında kurmuştur. Ancak bu santralin sıcak su kullanım

sözleşmesi olmaması sebebiyle çalışma durdurulmuştur. 2009 yılında Kızıldere jeotermal santrali ve bulunduğu saha özelleştirilmiş, sahanın işletme hakkı Zorlu Enerji AŞ. tarafından alınmıştır. Santralde iyileştirme çalışmaları yapılmış, yeni kuyular delinip 15 MW kurulu güçte çalıştırmaya başlanmıştır [41].

Jeotermal enerjiden, elektrik üretimi, ısıtmacılık, kimyasal madde üretimi (sıvı karbondioksit) ve deri işleme gibi birçok farklı alanda yararlanılmaktadır. En önemli tüketim alanları ise ısıtma (konut, sera) ve sağlık turizmi olmuştur. Ülkemizdeki sıcak su çıkan bölgeler, genel olarak orta-düşük sıcaklıklarda olmasından dolayı, jeotermal akışkanlardan kaplıcalar yolu ile yararlanılmaktadır. Düşük sıcaklıklı olarak adlandırılan 20–70 °C sıcaklık aralığındaki jeotermal suların elde edildiği sahaların fazlalığı, kaplıca kullanımını yaygınlaştırmıştır [42].

Türkiye’ de jeotermal enerjiden bahsetmeden önce ülkenin genel enerji durumunu inceleyerek, jeotermal enerjiden elektrik üretimi amaçlı faydalanma durumumuzu net bir şekilde görebiliriz. Çizelge 3.2’ de 31 Ekim 2015 sonu itibariyle Türkiye’nin yakıt cinslerine göre kurulu gücü verilmektedir [43].

Çizelge 3.2. Türkiye’nin yakıt cinslerine göre kurulu güç dağılımı [43].

YAKIT CİNSLERİ	31 EKİM 2015 SONU İTİBARIYLA		
	KURULU GÜÇ	KATKI	SANTRAL SAYISI
	MW	%	ADET
FUEL-OİL + ASFALTİT + NAFTA + MOTORİN	742,2	1,0	15
TAŞ KÖMÜRÜ + LİNYİT	8.723,4	12,0	25
İTHAL KÖMÜR	6.064,2	8,4	8
DOĞALGAZ + LNG	21.304,7	29,4	230
YENİLEN.+ATIK+ATIKISI+PİROLİTİK YAĞ	328,4	0,5	66
ÇOK YAKITLILAR KATI+SIVI	653	0,9	7
ÇOK YAKITLILAR SIVI+D.GAZ	3.847,2	5,3	38
JEOTERMAL	614,2	0,8	21
HİDROLİK BARAJLI	18.126,2	25	89
HİDROLİK AKARSU	7.522,6	10,4	467
RÜZGAR	4.280,1	5,9	111
TERMİK (LİSANSSIZ)	45,7	0,1	21
RÜZGAR (LİSANSSIZ)	0,6	0,0001	3
GÜNEŞ (LİSANSSIZ)	203,1	0,3	306
TOPLAM	72.455,4	100,0	1.407

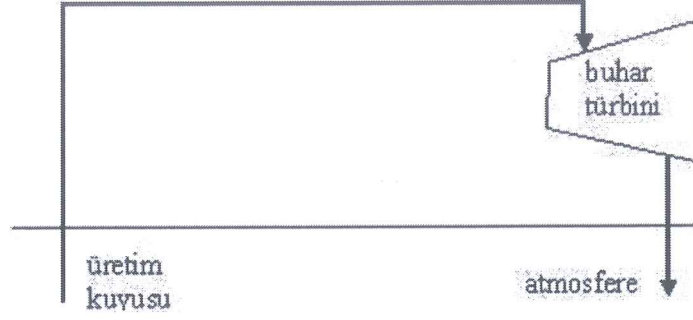
3.4. JEOTERMAL ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Jeotermal kaynaklar çeşitli yapıda termodinamik, çevresel, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Elektrik üretiminde; jeotermal kaynağın uygunluğu, kaynağın debisi, basıncı ve sıcaklığı gibi termodinamik özelliklere ve ekonomik parametrelere göre farklı termodinamik çevrimler kullanılmaktadır. Termodinamik çevrim, bir akışkanın geçirdiği hal değişimleri sonunda ilk haline döndüğü ve bunun tekrarlandığı süreci ifade etmektedir. Jeotermal elektrik santrallerinde, sıcak akışkanlar yerin altı tabakalarından çıkarıldıktan sonra elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Daha sonra atmosfere atılmakta veya yere geri basılmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan çevrimler, kondensersiz ve kondenserli kuru-buhar çevrimleri, kombine flaş -çift akışkanlı çevrim, çift akışkanlı çevrim, rejeneratörlü çevrim, tek ve çift flaşlı çevrimler ve Kalina çevrimi olarak sınıflandırılmaktadır. Jeotermal kaynağın durumuna göre en uygun güç çevriminin seçilmesi gerekmektedir [14].

3.4.1. Kuru – Buhar Elektrik Santralleri

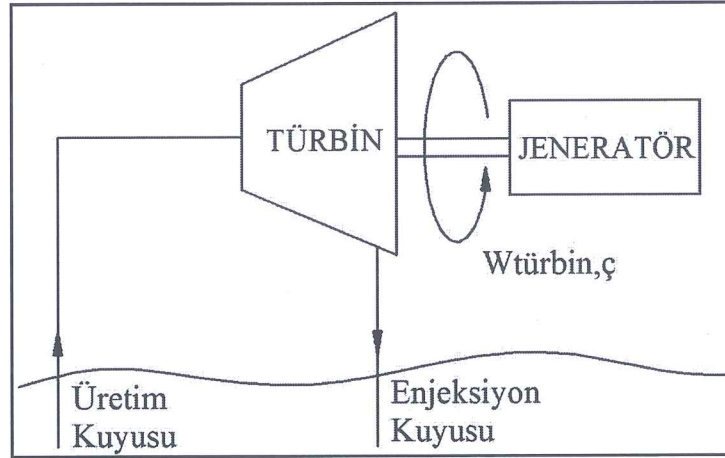
Jeotermal santral çeşitleri arasında en kolay olanı kuru buhar santralleridir. Bu tür elektrik santralleri, doymuş veya kızgın jeotermal buhar bulunan bölgelerde kullanılmaktadır. Jeotermal kaynaktan çıkan buhar, kuru buhar ya da hafif kızgın buhar şartlarında doğrudan buhar türbini-jeneratör grubuna aktarılarak elektrik üretilebilmektedir. Dünya’da bu özelliklere sahip kaynaklara örnek, İtalya-Larderello’ da ki ve ABD-The Geysers’deki kaynaklar gösterilebilir.

Santraller arasında en basit ve ekonomik olan jeotermal çevrim kondensersiz kuru buhar çevrimidir. Bu buhar çevriminde, jeotermal kuyudan çıkarılan buhar türbinden geçtikten sonra atmosfere bırakılır. Türbin çıkışı atmosfere doğru açık olduğundan buhar, türbini atmosfer basıncında terk eder [14]. Bu çevrimin avantajı, santralin yapım ve işletme maliyetinin kondenserli santrallere nazaran daha az olmasıdır. Şekil 3.7’ de kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santralinin basitleştirilmiş akış diyagramı görülmektedir [5].



Şekil 3.7. Kondensersiz kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış şeması [5].

Kondenserli kuru buhar çevrimlerinde kondenser, türbin çıkışında yer alır. Jeotermal buhar, türbinden geçtikten sonra bir kondensere girerek yoğuşturulur. Yoğuşturulan buhar, ideal olarak tekrar yeraltına enjekte edilir, atık olarak bir ırmağa ya da göle dökülür. Kondenser yardımıyla türbin çıkışında, atmosfer basıncının alt kısmında bir vakum oluşturulur. Buhar, türbini düşük basınçta ve sıcaklıkta dolayısıyla daha düşük bir entalpide terk etmiş olur. Böylece buharın ısıl enerjisinin büyük oranı güce çevrilir. Kondenserli kuru buhar çevrimleri, kondensersiz çevrimlerle benzer şartlar altında daha çok elektrik üretirler [7, 18]. Şekil 3.8’de kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santralinin basitleştirilmiş akış şeması görülmektedir [5, 14].

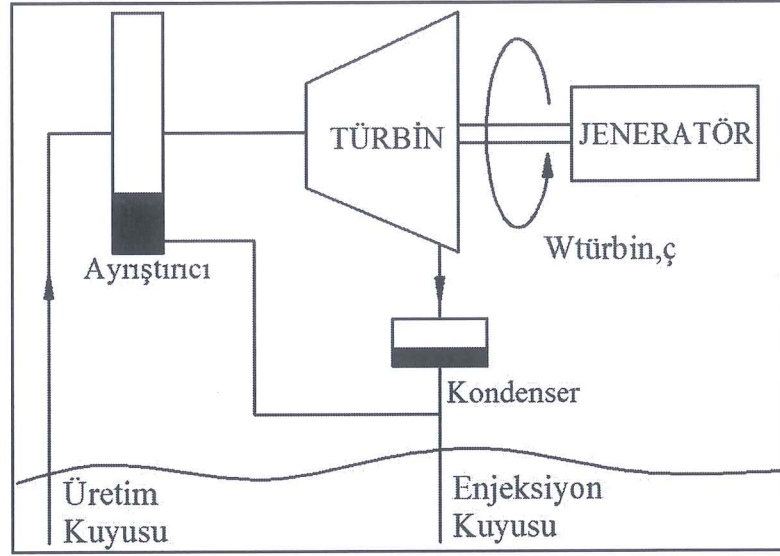


Şekil 3.8. Kondenserli kuru buhar çevrim jeotermal elektrik santrali akış şeması [5].

3.4.2. Tek Flaş (Tek Püskürtmeli) Elektrik Santralleri

Tek flaş (tek püskürtmeli) jeotermal elektrik santrallerinde, kaynak sıcaklığı yaklaşık olarak 200-260°C aralığındadır. Sistem verimi % 30-35 arasında değişmektedir. Bu

sistemde, ayrıştırıcıda, düşük basınçta sıvı bulunmaktadır. Bu tanka kuyudan gelen yüksek basınçta ve sıcaklıktaki jeotermal su gönderilir. Böylelikle sıvı hızlı bir şekilde buharlaşır ve buhar türbine gidip hareket ettirilir [1,14,27]. Şekil 3.9’da tek püskürtmeli bir jeotermal elektrik santralinin şekli görülmektedir.



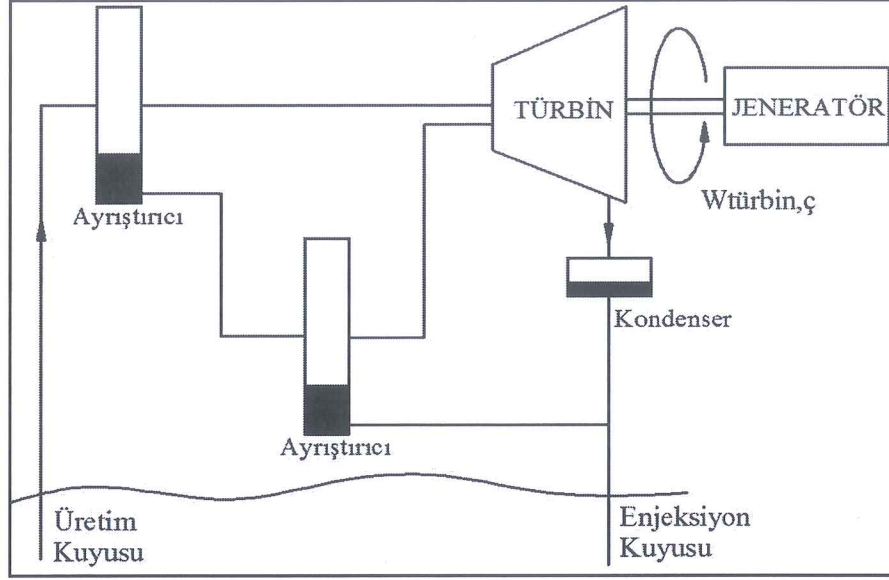
Şekil 3.9. Tek flaş (tek püskürtmeli) jeotermal elektrik santrali [1].

Ülkemizde tek flaşlı kurulmuş bir santral örneği olarak Kızıldere Jeotermal santrali verilebilir. Üretilen jeotermal akışkanın sıcaklığı yüksek olduğu zamanda püskürtme işlemi birden fazla gerçekleştirilebilir. İlk püskürtme işleminde elde edilen buhar, türbine gönderildikten sonra kalan sıvının basıncı ve sıcaklığı hala yüksek ise bu sıvı ikinci bir püskürtme havuzunda yeniden püskürtülür [14].

3.4.3. Çift Flaş (Çift Püskürtmeli) Elektrik Santralleri

Çift flaş santraller, kuyudan elde edilen akışkan sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda kullanılır. Bu santral yaklaşık 240-320 °C aralığında kaynak suyu bulunan yerlerde kullanılır, bu sistem verimi %35-45 arasında değişir. Jeotermal akışkan ilk önce bir ayrıştırıcıya girer ve tekli flaş sistemdeki gibi ayrıştırıcıdan geçerek türbine gönderilir. Geriye kalan akışkan, ikinci bir ayrıştırıcıya girer ve buradan ikinci bir türbine (alçak basınçlı) ya da aynı türbine gönderilerek jeotermal

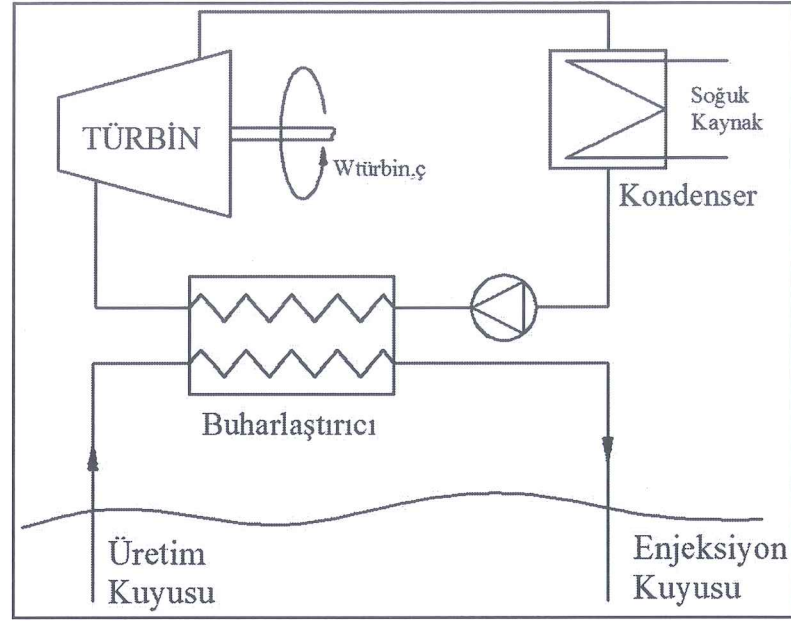
sudan iki kez faydalanılmış olur [1,27]. Çiftli flaş (çift püskürtmeli) Jeotermal elektrik santrali Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Çift flaş (çift püskürtmeli) jeotermal elektrik santrali [1].

3.4.4. İkili Çevrim (Binary) Elektrik Santralleri

Binary santraller genellikle $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ üstü ve $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ altındaki jeotermal sistemler ve kuru sıcak kayaç sistemlerinin akışkanları için en verimli çevrim olarak kabul edilmektedir. Bu çevrimde türbinden, kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından daha düşük olan ikincil akışkan adı verilen bir akışkan geçer. Bu çevrimde jeotermal akışkan, çevrimin ısı kaynağını oluşturur. Jeotermal ikincil çevrim santrallerinde Pentan, İzopentan, izobütan ve R-114 yaygın olarak kullanılan ikincil akışkanlardır [5,7,14]. Binary santrallerin güç kapasiteleri genellikle, $100\text{-}200\text{ KWe}$ ' den 3 MWe ' ye kadardır. $10\text{-}50\text{ MWe}$ ' lik daha büyük sistemler için genellikle birkaç küçük modüler ünitenin bir araya getirilmesi gerekir. Akışkan sıcaklıkları düşük olduğu için binary güç çevriminin termal verimleri % 10 ile % 17 arasındadır. Dünyanın hemen hemen her yerinde bulunan düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan, güvenilir ve uygun maliyetlerle elektrik üretmek için bu sistemi kullanmak oldukça avantajlıdır [27].



Şekil 3.11. İkili jeotermal elektrik santrali.

Binary çevrim jeotermal elektrik santrallerinin kullanılabilirlik verimleri, diğer tip santrallere göre oldukça yüksektir. Binary çevrim jeotermal santrallerinin avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir;

Avantajları;

- Düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynakların kullanımına uygun olmaları,
- Türbin boyutlarının küçüklüğü ve daha kullanılabilir olması,
- Yüksek basınçlarda yüksek verimli çalışabilmesi,
- Hava sızması gibi sorunların oluşmaması,
- Çalışma sıvısının korozif olmaması,
- İzoentropik türbin verimlerinin daha yüksek olması,
- Daha düşük kondenser basınçları ve daha yüksek sistem verimleri,
- Sistemden atmosfere zararlı gazların salınım yapmaması [5].

Dezavantajları;

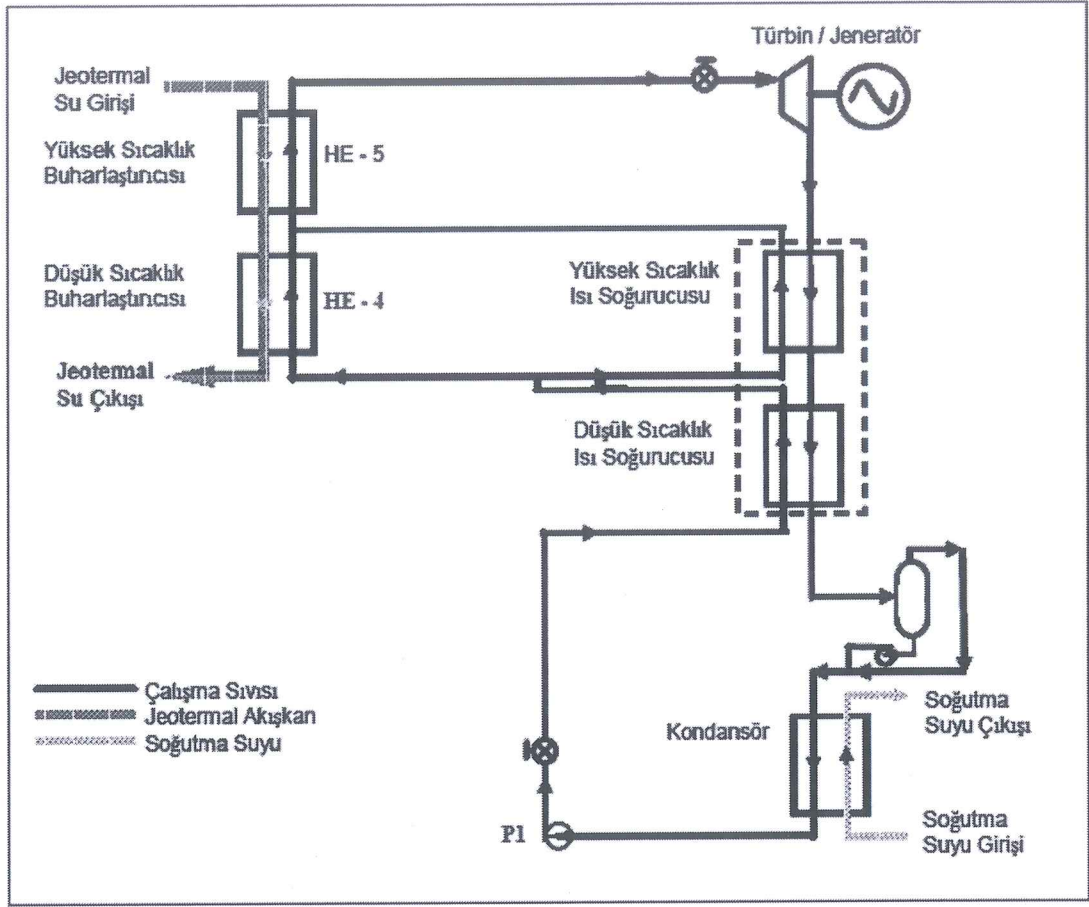
- İkincil sıvı maliyetinin yüksek olması,
- Isı değiştiricilerinin pahalı olması,
- Jeotermal akışkandaki akış oranının yüksek olması,
- İkincil akışkan hidrokarbon olursa, hidrokarbonun yanıcı olabileme riski [5].

3.4.5. Kalina Çevrim Elektrik Santralleri

Kalina çevrim santralleri çok düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklar için tasarlanmış olup, çalışma sıvısı olarak amonyak/su kullanmaktadır. Kalina çevrimindeki jeotermal akışkan buharlaştırıcısı %70 oranında kaliteli buhar üretmektedir. Amonyak/su absorpsiyon yöntemiyle türbin çıkış basıncını düşürmektedir. Bu durum ORÇ sistemlerine göre %25'lik bir verim avantajı sağlamaktadır [44]. Kalina çevriminde normal buhar türbinleri, boru tipi ve plakalı ısı değiştiricileri kullanılmaktadır.

Kalina çevrimi Dr. Alexander Kalina tarafından tasarlanmış bir çeşit binary çevrimdir. Çevrimin amacı düşük ve orta entalpili jeotermal kaynaklardan daha verimli elektrik üretmektir. Çevrimin temel elemanları; buhar türbini, jeneratör, buharlaştırıcı, ayırıştırıcı, yogusturucu, reküperatör ve pompadır [38]. Çevrimin kazançları, buharlaştırıcıdaki ısı değişimi prosesinden ve yoğuşturucudaki ısı değarjı prosesinden gelmektedir. Kalina çevriminde ikinci akışkan olarak amonyak–su karışımının sečilmesinin sebebi, bu karışımın buharlaşma sırasındaki sıcaklık değişim eğrisi ile jeotermal akışkanın ısı verme sırasındaki sıcaklık azalma eğrisinin birbiriyle çok yakın aralıkta olmasıdır. Bu yakınlık enerji dönüşümündeki verimliliğin temel sebeplerinden birisidir [14].

Kalina çevriminde üretilen güç miktarları diğer güç çevrimlerindeki güç miktarlarından biraz fazladır. Bu verim artışının sebepleri Kalina çevrimindeki buharlaşma, yogusma ve reküperasyon prosesleri sebebi ile ilgilidir [5].



Şekil 3.12. Kalina tip binary sistemden elektrik üretimi [44].

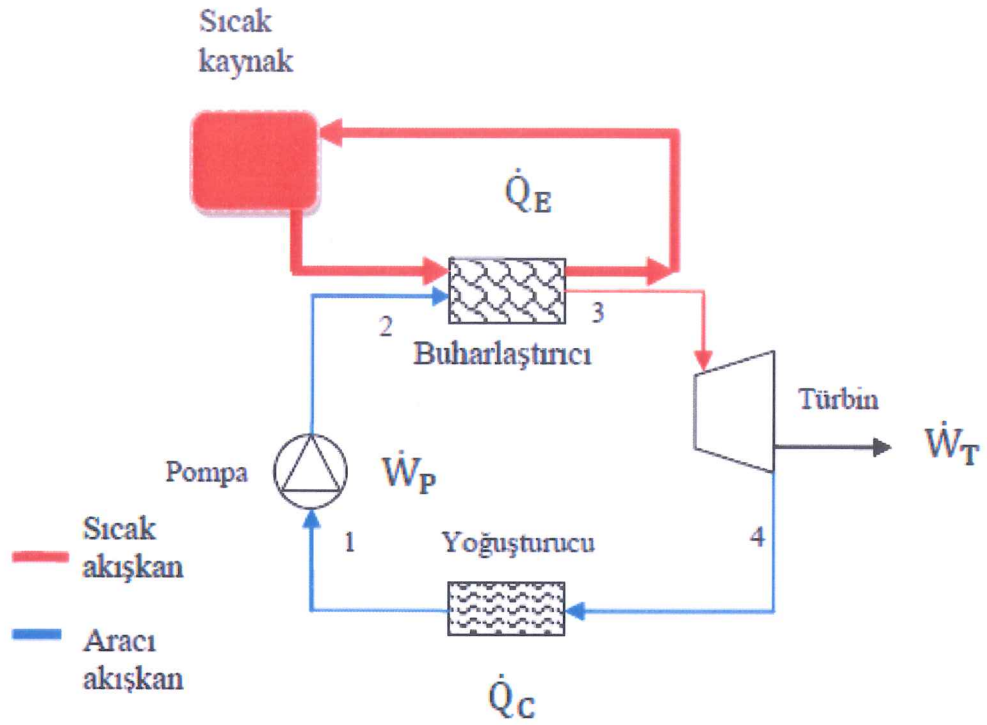
Kalina tip binary çevrimi şematik olarak Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu çevrimde, çalışma akışkanı düşük sıcaklık buharlaştırıcısında ön ısıtmaya tabi tutulmakta daha sonra yüksek sıcaklık buharlaştırıcısında tamamen buharlaştırılmaktadır. Yapılan bu işlem, jeotermal akışkandan etkili bir şekilde çalışma sıvısına ısı alımı sağlamaktadır. Bu ısı alımı, kullanılan çalışma sıvısının özelliği sebebiyle, izopentan ORÇ sistemlerinden daha az termodinamik kayıp oluşturmaktadır. Jeotermal akışkan ve çalışma sıvısı arasındaki sıcaklık farklarının daha fazla olması bu kayıpların sebebinin oluşturmaktadır [44].

BÖLÜM 4

ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

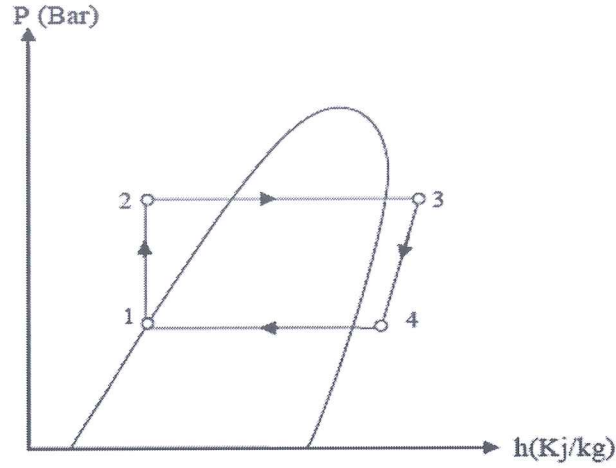
Çevre sorunlarından dolayı düşük sıcaklıklı kaynaklardan enerji elde etmek son yıllarda çok önemli bir hale gelmiştir. Bu sorunların çözümü için birçok öneri ortaya atılmıştır. Şu anda önerilen çözümler arasında Organik Rankine çevrimi en yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca avantajı, basit oluşu ve kolay bulunan bileşenleridir. Geleneksel güç çevrimlerinin aksine bu çevrimler küçük ölçekli enerji üretimi için düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Aynı zamanda organik soğutucu akışkan gazları da kullanıldığı için çevre dostudur.

Isıdan elektrik enerjisi üretme amacı için kullanılan ORÇ teknolojisi buharlaştırıcıdaki organik çalışma sıvısını buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki ısıyı kullanır. Bu kaynaktan gelen ısı buharlaştırıcıda akışkana ısınıyı aktarır ve buhar haline gelir. Seçilen çalışma sıvısı; silikon bazlı sıvılar, bazlı sıvılar ya da düşük sıcaklıklar için hidrokarbon soğutucu olarak kullanılabilir. Basınçlı buhar daha sonra türbinlere gönderilir, jeneratör ile birleştiği zaman elektrik üretir. Yüksek basınç ve sıcaklıkta türbine gelen akışkan türbinde genişleyerek basınç ve sıcaklığı düşer. Basınç ve sıcaklığı düşen akışkan yoğuşturucuya gelir. Buhar, yoğuşturucu içinde tekrar sıvı hale yoğunlaştırılır. Yoğuşturucudan pompaya düşük basınçta gelen akışkanda tekrar sıvı pompası ile buharlaştırıcıya basılır ve sistemin çalışması bu şekilde devam eder. Sıcak ısı kaynağı olarak kullanıldığı için yakıt maliyeti oranı çok düşüktür. Herhangi bir yanma prosesi gerçekleşmediğinden, ORÇ enerji sisteminde atmosfer ortamına zararlı emisyon salınımı oluşmaz. ORÇ sistem şeması Şekil 4.1'de verilmiştir [45].



Şekil 4.1. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması [45].

Organik Rankine çevrimi beş bileşenden meydana gelir: pompa, evaporatör (buharlaştırıcı), türbin, kondenser (yoğuşturucu) ve çalışma akışkanı. Evaporatör ve kondenser ısı değiştiricisi olarak çalışırlar. Evaporatör ısıyı çevrime absorbe ederken kondenserde ısıyı çevrimden dışarı atar. Pompa çevrim içerisindeki akışkanı sıkıştırarak evaporatöre yollar. Evaporatörde sıcak kaynaktan gelen akışkan ısısını çalışma akışkanına aktarılır. Burada sıcaklığı artan aracı akışkan buhar veya kızgın buhar fazına geçer. Daha sonra buhar güç üretmek için türbin kısmına gelir. Türbinde genişleyen buharın basınç ve sıcaklığı düşer ve kondensere gelir. Burada da tekrar sıvı fazına geçen akışkan pompaya gelir [1,45]. Çevrim bu şekilde sürekli olarak devam eder. Şekil 4.2’de ORÇ sisteminin basınç ve entalpi (P-h) diyagramı verilmiştir [45].



Şekil 4.2. ORÇ basınç entalpi (P-H) diyagramı.

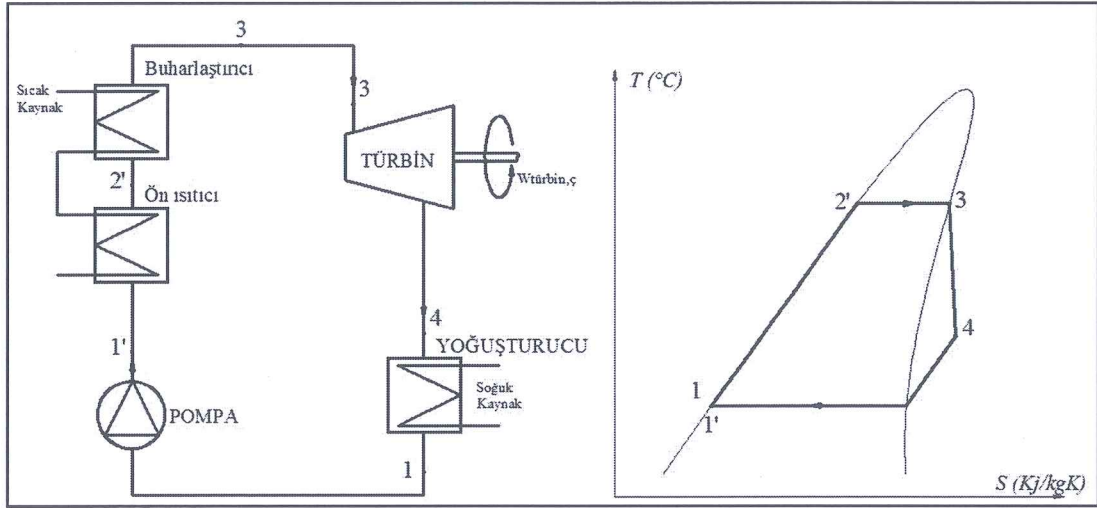
ORÇ sistemlerde çalışma koşullarına ve farklı kaynak ve emici sıcaklıklarına bağlı olarak çeşitli çalışma sıvıları kullanılabilir. Ancak ORÇ sistemlerde düşük dereceli ısı enerjisi kullanımı içerir. ORÇ sistemlerde kullanılan organik akışkan aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir [16, 24].

- Düşük kaynama ve donma noktası.
- Yüksek kritik sıcaklığı.
- Yüksek buharlaşma sıcaklığı.
- Yüksek yoğunluk.
- Düşük çevre kirliliği.
- Güvenlik.

4.1. BASİT RANKİNE ÇEVİRİMİ

Günümüzde düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerjisinin kullanımı daha önemli hale gelmektedir. Bu kaynakların başında jeotermal kaynaklar, güneş enerjisi ve egzoz enerjisi gelmektedir [13]. Basit Organik Rankine Çevrimi 4 ana elemandan oluşur. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, buharlaştırıcı (evaporatör), türbin, yoğuşturucu (kondansatör) ve pompadır. Bu ORÇ teknolojisinin çalışma sistemi şu şekildedir: Buharlaştırıcı içerisindeki organik çalışma sıvısını buharlaştırmak için sıcak kaynaktaki ısıyı kullanır. Buharlaştırıcı olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir. Bu işlem sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur.

Basınçlı buhar daha sonra türbinlere yollanır ve jeneratörle birleştiğinde elektrik üretir. Basit ORÇ sisteminde genellikle kaynaktan elde edilen ısının verimini arttırmak için buharlaştırıcıdan sonra ön ısıtıcı kullanılır [30]. ORÇ sisteminde kullanılacak akışkanın seçimi hem verim hem de çevresel etkiler bakımından çok önemlidir. ORÇ sistemi taşıtlarda geri kazanım yöntemi olarak da kullanılmaktadır. Normal bir araçta %10 daha fazla güç üreterek yakıt sarfiyatında %5 ile %30 arasında azalma gözlenmektedir. 2008'de sunulan sonuçlara göre saatte 62 mil ile giden bir araçta ORÇ sistemini kullanmak verimde %3.8 oranında artış sağlamaktadır [46].

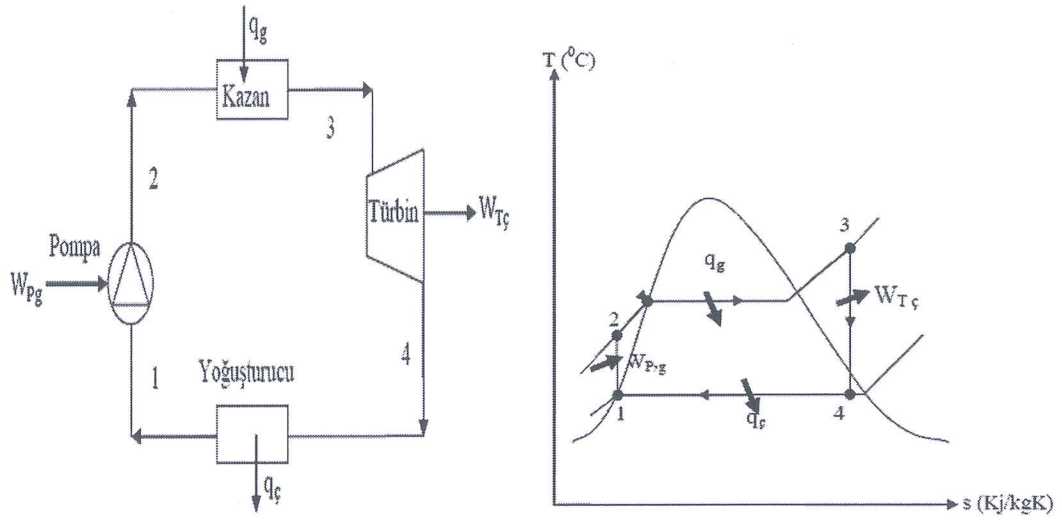


Şekil 4.3. Basit ORÇ sistemi ve T-S diyagramı.

4.2. İDEAL RANKİNE ÇEVİRİMİ

Güç üretim tesislerin çoğu Rankine çevrimine dayanmaktadır. Rankine çevrimi ısıyı işe dönüştüren bir çevrimdir. Isı genellikle dışarıdan temin edilir ve buharlı güç çevrimlerinde en ideal olanı Rankine çevrimidir. Basit buharlı güç santrali kazan, pompa, türbin ve yoğuşturucudan oluşmaktadır. Basit buharlı güç santrallerinde su çalışma sıvısı olarak kullanılmaktadır. Pompa yardımıyla su basıncı artırılır ve su basıncı artmış şekilde kazana gönderilir. Kömür, doğalgaz, motorin vb fosil kökenli yakıtlar buhar kazanlarında yakılır. Bunların yanması sonucunda oluşan ısı enerjisi kazandaki borularda dolaşan suya gönderilir ve böylece su kızgın buhar haline dönüşür. Kazanda meydana gelen yüksek basınçlı kızgın buhar türbine aktarılır.

Yüksek basınçlı kızgın buharın, buhar türbininin kanatlarına çarpmasıyla mekanik enerji elde edilir. Bu buhar türbininin mekanik hareketiyle buhar türbininin miline bağlı olan jeneratörden elektrik üretilir. Düşük basınçta buhar türbininden çıkan buhar yoğuşturucuda yoğuşturularak sıcaklığı düşürülür ve tekrar sıvı hale getirilir. Açığa çıkan düşük basınç ve sıcaklıktaki su tekrar pompaya gelir. Suyun pompadan çıkıp tekrar pompaya dönmesiyle buharlı güç çevrimi gerçekleşmiş olur. Bu çevrim güneş enerjisi, biokütle, kömür ve nükleer santraller de dâhil olmak üzere Dünya genelinde kullanılan tüm elektrik gücünün yaklaşık % 90'ını oluşturur. Aşağıda basit bir ideal Rankine çevriminin şekli ve T-s diyagramı gösterilmiştir [45, 46, 47].



Şekil 4.4. Temel ideal Rankine güç çevrimi ve T-S diyagramı [1,33].

İdeal Rankine çevriminde içten tersinmezliğin olmadığı 4 hal değişimi vardır. Bunlar;

- 1-2 Pompada izantropik sıkıştırma,
- 2-3 Kazanda sabit basınçta ısı girişi,
- 3-4 Türbinde izantropik genişleme,
- 4-1 Yoğuşturucuda sabit basınçta ısı atılması [1,45].

Rankine çevrimini oluşturan dört elemanın (kazan, pompa, türbin ve yoğuşturucu) tümü sürekli akışlı makinelerdir. Bu nedenle Rankine çevrimi de sürekli dört akışlı açık sistemden oluşan bir çevrim olarak incelenebilir. Buharın kinetik ve potansiyel enerjisindeki değişim genellikle iş ve ısı geçişine oranla küçüktür ve bu yüzden

göz ardı edilebilir. Sürekli akışlı açık sisteme ilişkin enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(q_g - q_c) + (w_g - w_c) = h_{\text{çıkış}} - h_{\text{giriş}} \quad (4.1)$$

Kazan ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur. Ayrıca pompa ve türbindeki hal değişimlerinin izantropik olduğu varsayılır. Bu durumda her bir sistem için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Pompa (} q=0\text{)} \quad (w_{\text{pompa,g}}) = h_2 - h_1 \quad (4.2)$$

$$\text{Veya} \quad (w_{\text{pompa,g}}) = v(P_2 - P_1) \quad (4.3)$$

$$\text{Kazan (} w=0\text{)} \quad q_g = h_3 - h_2 \quad (4.4)$$

$$\text{Türbin (} q=0\text{)} \quad w_{\text{türbin,ç}} = h_3 - h_4 \quad (4.5)$$

$$\text{yoğuşturucu (} w=0\text{)} \quad q_c = h_4 - h_1 \quad (4.6)$$

Rankine çevriminin ısı verimi:

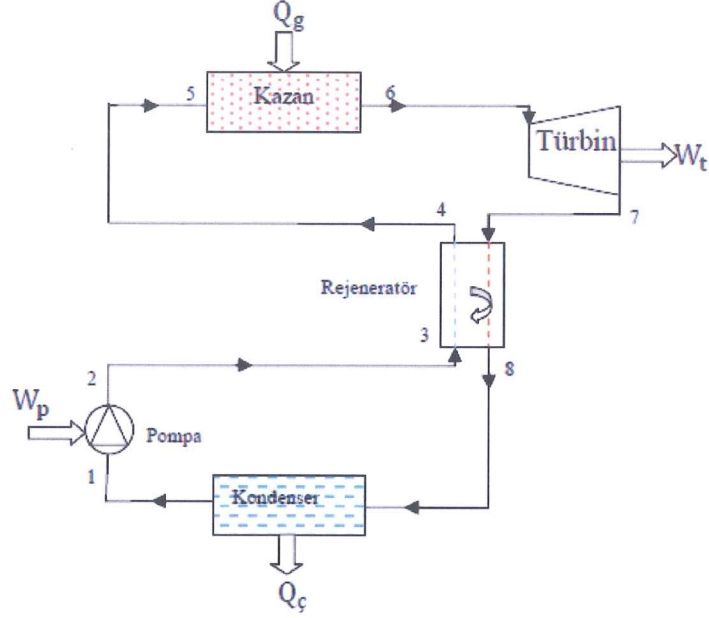
$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_g} = 1 - \frac{q_c}{q_g} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

4.3. REJENERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

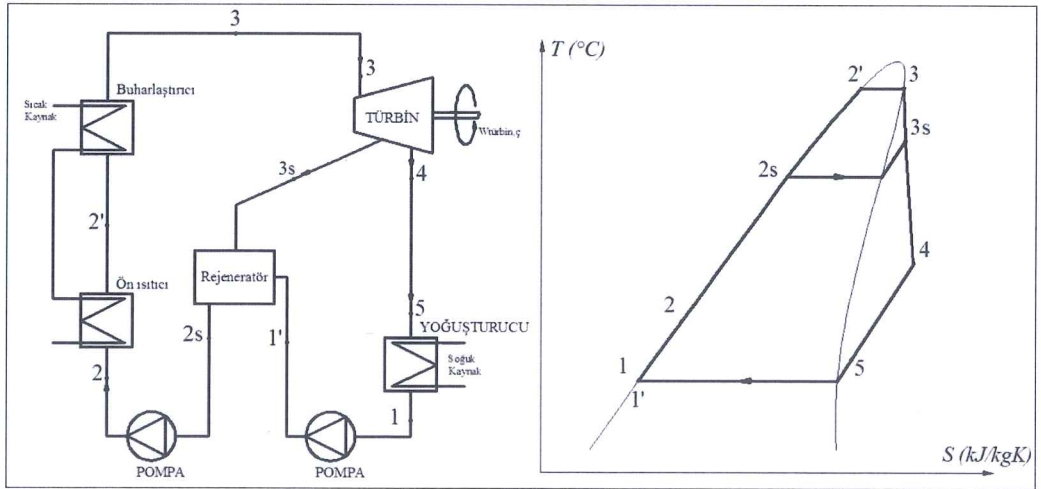
Rejeneratif ORÇ sistemi Şekil 4.5'te verilmiştir. Temel ORÇ' li sistemlerden farklı olarak türbinden çıkan sıcak çalışma akışkanı ile pompadan çıkan soğuk çalışma akışkanı arasında ısı transferini sağlamak için ısı değiştiricisi bulunur. Rejeneratif kelimesi çevrim içerisinde ki ısının yeniden çevrim içinde oluştuğunu ifade eder.

Bundan dolayı daha az termal enerji kaynağı gerekir; çünkü rejeneratör boyunca akışkana ön ısıtma uygulanır [24, 30, 45, 47].



Şekil 4.5. Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) tesisat şeması.

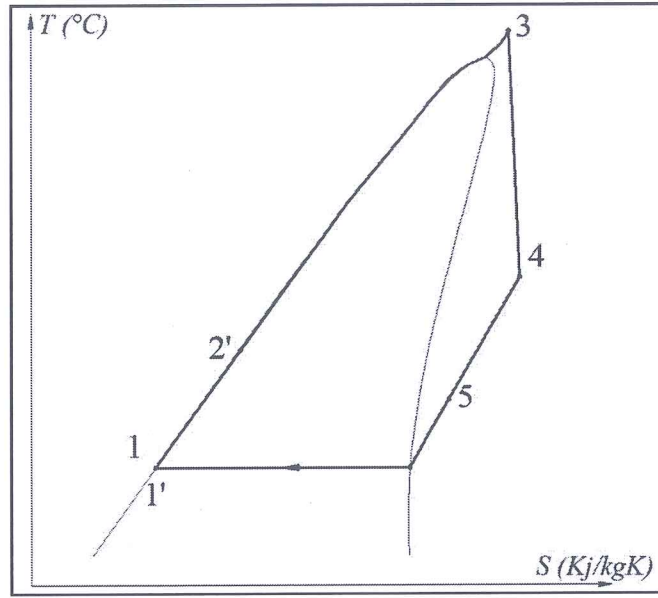
Rejeneratör bu çevrimde türbinin çıkışı ile pompanın çıkışı arasında bağlanır ve ısı değiştiricisi görevi yapar. Pompadan çıkan soğutucu akışkana türbinden gelen akışkan ısısının bir kısmını aktarır ve kazana girmeden önce ön ısıtma yapılmış olur. Buda sistemin ısıl verimi artırır. Şekil 4.6'da Rejeneratif Organik Rankine T-s diyagramı verilmiştir [30, 45].



Şekil 4.6. Rejeneratif Organik Rankine Çevriminin T-s diyagramı [1].

4.4. SÜPERKRİTİK ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

ORÇ sistemlerinin diğer bir tasarımı olan süperkritik ORÇ inde akışkan kritik nokta üzerinde çalışır.. Çevrim boyunca akışkan tekrar basınçlandırılmadan önce türbinde genişler, soğur ve yoğuşarak alt basınç bölgesine ulaşır. Alt kritik nokta ya gelen akışkanın buradan basıncı artar ve süperkritik noktaya ulaşır. Süperkritik ORÇ sistemlerde çevrim boyunca çalışma akışkanının ısıtılması sırasında sabit bir basınç olmadığından dolayı sabit bir sıcaklık yoktur [30, 45].



Şekil 4.7. Süperkritik Organik Rankine Çevriminin T-S diyagramı [45].

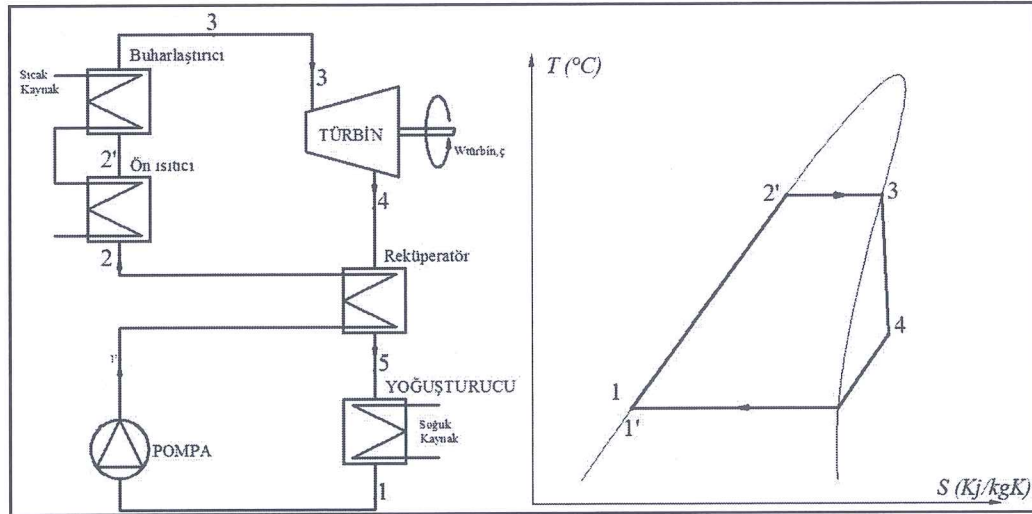
ORÇ sistemlerde en önemli konulardan birisi ısı kaynağına olan bağlantı kısmı iyi tasarlanmalıdır. Doğal ısı kaynağına bağlı olarak uygun ısı değiştiricisi seçilmesi gerekir veya minimum sıcaklık farkına göre tasarlanmalıdır. Akışkan olarak birkaçı tavsiye edilebilir;

- Eğer ısı kaynağı sıcak sıvı ise (jeotermal vb.) çalışma sıvısı ile sıcak kaynak arasında plakalı ısı değiştiricisi monte edilebilir. Diğer bir seçenek de borulu tip ısı değiştiricisi kullanılabilir [30].
- Isı kaynağı sıcak bir gaz ise (çimento veya metal dökümden gelen baca gazı) uzun yüzeye sahip ısı değiştiricisi kullanılabilir [30].

ORÇ sistemler için ısı kaynağı olarak farklı tür akışkanlar vardır. Düşük sıcaklık aralığı için çeşitli ısı transfer katsayılı yağlar vardır. 400 0C sıcaklığa kadar ısı transferi akışkanı olarak siloksanlar (R2SiO) kullanılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise çeşitli erimiş tuzlar önerilmektedir [45].

4.5. REKÜPERATİF ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

Rekuperatörlü ORÇ sisteminde, basit ORÇ sisteminden farklı olarak türbin çıkışındaki ısı kullanıp, bu ısıyı ön ısıtıcıya girecek olan organik akışkana aktarmak için bir rekuperatör kullanılır. Rekuperatör sistemdeki organik akışkanın kondensere girmeden önce ısını atmasını aynı zamanda da ön ısıtıcıya girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansını artırır [14, 24, 30]. Şekil 4.8’de rekuperatif bir ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı görülmektedir [30].



Şekil 4.8. Rekuperatif ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı [30]

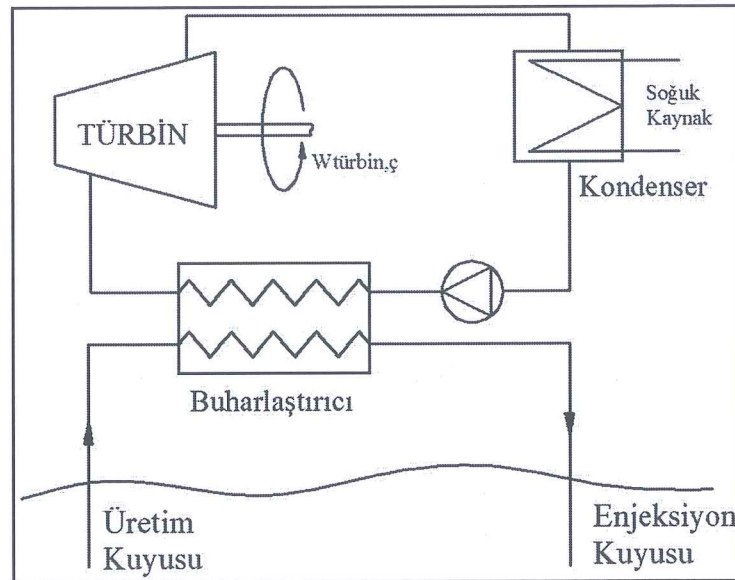
4.6. ORÇ SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Literatüre bakıldığında zaman ORÇ sisteminin temel uygulama alanları; atık ısı geri kazanım sistemleri, güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynakları, biyokütle kaynakları olarak görülmektedir.

4.6.1. İkili Jeotermal Güç Sistemleri

Çift çevrimli bir santralde bütün enerji dönüşümü direkt olarak ana ısı kaynağı ile değil, ikincil bir sıvı ile gerçekleştirilir. Genel olarak çift çevrimli santraller iki döngüden oluşan Organik Rankine Çevrim (ORÇ) sistemleri olarak kurulurlar biri ısıyı ileten jeotermal akışkan, diğeri de ısıyı alıp kullanılabilir enerjiye dönüştüren aracı akışkandır ve kapalı çevrimde bulunmaktadır. ORÇ'nin hareketlendirici akışkanı genellikle hidrokarbondur. Çift çevrim, düşük ve orta entalpili veya yüksek kondense olmayan gazların bulunduğu kaynaklarda veya jeotermal kaynağın soğutulmasının herhangi bir sınırlamaya maruz kaldığı ortamlarda oldukça popülerdir. Güç çıkışı onlarca kW ile yüzlerce MW arasında olabilir [48].

Sıcaklığı 200°C ve daha fazla olan jeotermal akışkandan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Ancak günden güne gelişmekte olan yeni teknolojilerde 150°C e kadar, düşük hazne çıkışlı akışkandan da elektrik üretilebilmektedir [1,30]. Jeotermal ORÇ sistemlerinde yerin derinliklerinden elde edilen sıcak su veya buhar, ikili çevrimler aracılığıyla elektrige dönüştürülür. Şekil 4.9 'da ikili çevrimin basit bir şekli görülmektedir [1].



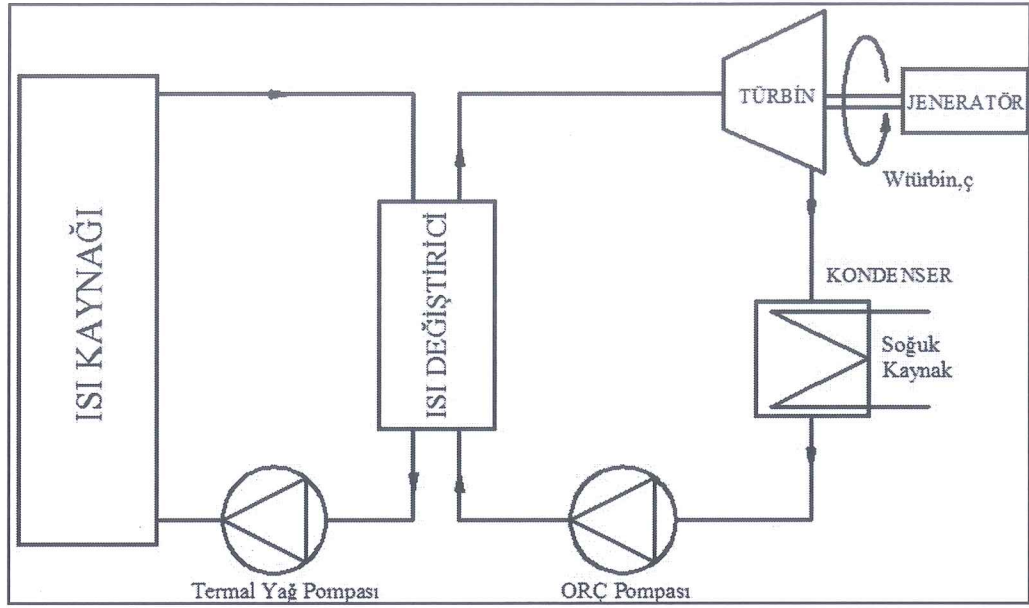
Şekil 4.9. İkili jeotermal elektrik santrali [1].

İkili çevrimlerde, üretim kuyusundan gelen jeotermal akışkan, buharlaştırıcı olarak kullanılan ısı değiştiricisine girerek, enerjisini, daha düşük sıcaklıklarda buhar fazına dönüşebilen organik akışkana aktarır. Organik akışkan buharlaştırıcıda ısıyı çekerek buharlaşır, türbinde genişir ve kondenserde yoğunur [24]. Buradaki organik akışkanın olduğu çevrim ORÇ çevrimidir. Bu sisteme ikili çevrim denilmesinin sebebi sistemin iki akışkandan oluşmasıdır. Jeotermal santrallerde ORÇ sistemi genellikle ikili (binary) çevrim olarak adlandırılır. Bu çevrim özellikle düşük sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan elektrik elde etmek için uygun bir yöntemdir [1, 30]. Jeotermal akışkanın korozif etkilerinden ve kabuk oluşturma sorunlarından kurtulmak için binary sistemler tercih edilir. Bu sistemde jeotermal akışkan, santralin hareketli elemanlarıyla temas etmediğinden dolayı, özellikle türbin gibi hassas elemanlar jeotermal akışkanın zararlı etkilerinden korunmuş olur [38].

4.6.2. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri

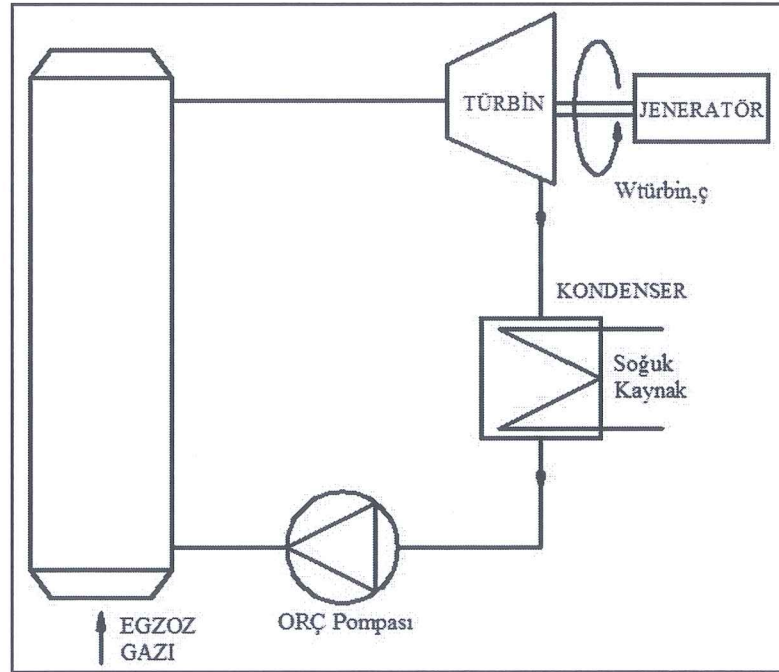
Atık ısı yanma veya benzeri bir kimyasal tepkime sonucunda açığa çıkan egzoz gazındaki sıcaklıktır. Endüstriyel enerjili yoğun prosesler, içten yanmalı motorlar, metal endüstrisi ve mekanik ekipmanlar yüksek miktarda atık ısı açığa çıkarırlar [1,48]. Atık ısının geri kazanılması için günümüzde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleridir. Yanma işlemi sonucunda ortaya çıkan egzoz gazının yeterli sıcaklık ve debide olması sonucunda, egzoz gazındaki enerji ORÇ sisteminde kullanılan organik akışkana aktarılarak bu sistemler kurulabilir. Egzoz gazlarının ORÇ sistemlerinde kullanılması boşa giden büyük bir enerji kaynağının değerlendirilmesini sağlarken aynı zamanda, bu gazların meydana getirdiği çevresel problemlerinde azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Atık ısının kullanılmasında, ısı değiştiricilerin seçilmesi çok önemlidir. Mevcut kaynaktaki enerji, iki farklı yolla değerlendirilebilir. Bunlardan birincisi, egzoz ısının ilk önce bir termal yağa aktarılarak, ardından yağdaki enerjinin ısı değiştiricisi aracılığıyla organik akışkana iletilmesi ile gerçekleştirir [1,24]. Şekil 4.10'da bu sistem görülmektedir.



Şekil 4.10. Termal yağ kullanılan atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri.

Atık ısının değerlendirilmesinde kullanılan ikinci yöntem ise, egzoz ısısının doğrudan bir ısı değiştiricisine gönderilmesi ile gerçekleşir. Organik akışkana aktarılan bu enerji ile çevrim için gerekli ısı enerjisi sağlanmış olur. Şekil 4.11' de bu sistem görülmektedir [30].



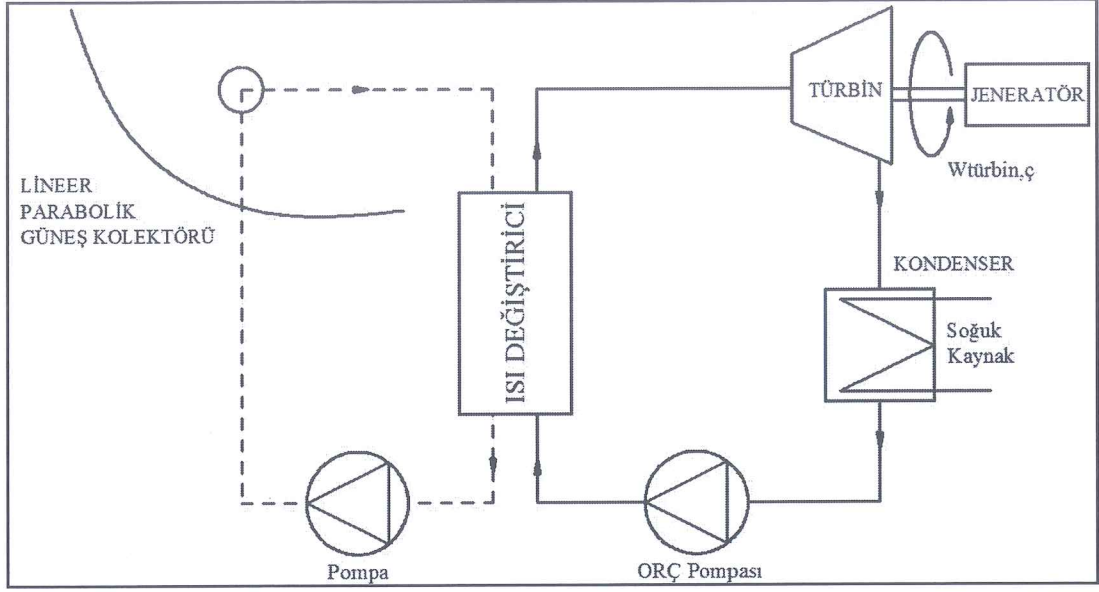
Şekil 4.11. Doğrudan ısı değiştiricili atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri [30].

Bu iki sistem karşılaştırıldığında doğrudan ısı değiştircili sistemlerde, eşanjör boyutları daha büyük sonuç vermekte ve maliyet artmaktadır. Ayrıca organik akışkanın yanıcı bir akışkan olması durumunda, yangın tehlikesi ortaya çıkabilir [1, 30]. ORÇ teknolojisi, atık ısının bulunduğu proseslerde yakıt tasarrufu sağlamak ve çevreyi korumak amacıyla geliştirilmiştir. Atık ısının bulunduğu sektörler güç üretim tesisleri, imalat prosesleri, teknik ekipmanların soğutulması, otomotiv endüstrisi ve deniz taşımacılığıdır [24].

4.6.3. Güneş Enerjili ORÇ Sistemleri

Güneş enerjisi sınırsız ve tükenmeyen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca çevre dostu olan bu enerjinin kullanımı fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel etkilerden dolayı gün geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisi, endüstride bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle sıcak su ihtiyacı, proses ısıtma, endüstriyel kurutma sistemleri ve fotovoltaik piller aracılığıyla elektrik üretimi güneş enerjisinin başlıca kullanım alanlarından [1].

Gelişen teknoloji sayesinde güneş enerjisi uygulamalarında yüksek sıcaklara çıkmak mümkün olmaktadır. Bu sıcaklık ile ORÇ sistemleri kurulup elektrik üretmek mümkün hale gelmiştir. Kaynak sıcaklık olarak bir güneş kolektöründen geçen akışkanın ısısını kullanan ORÇ sistemleri birçok uygulamada kullanılmaktadır [1,24]. Güneş enerjisinden yararlanılarak elde edilen elektrik enerjisinin üretiminde iki yöntem vardır. Bunlardan birincisi; doğrudan güneş enerjisini fotovoltaik piller ile elektrik enerjisine dönüştürmek, ikincisi ise güneş enerjisi ile su buharı veya sıcak gaz üretmektir. Sonrasında buhar veya sıcak gazı konvansiyonel yoldan buhar veya gaz türbinine sevk ederek, türbine bağlı bulunan jeneratörden elektrik üretmektir [30]. Aşağıdaki şekilde güneş enerjili bir ORÇ sistemi görölmektedir.



Şekil 4.12. Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri [49].

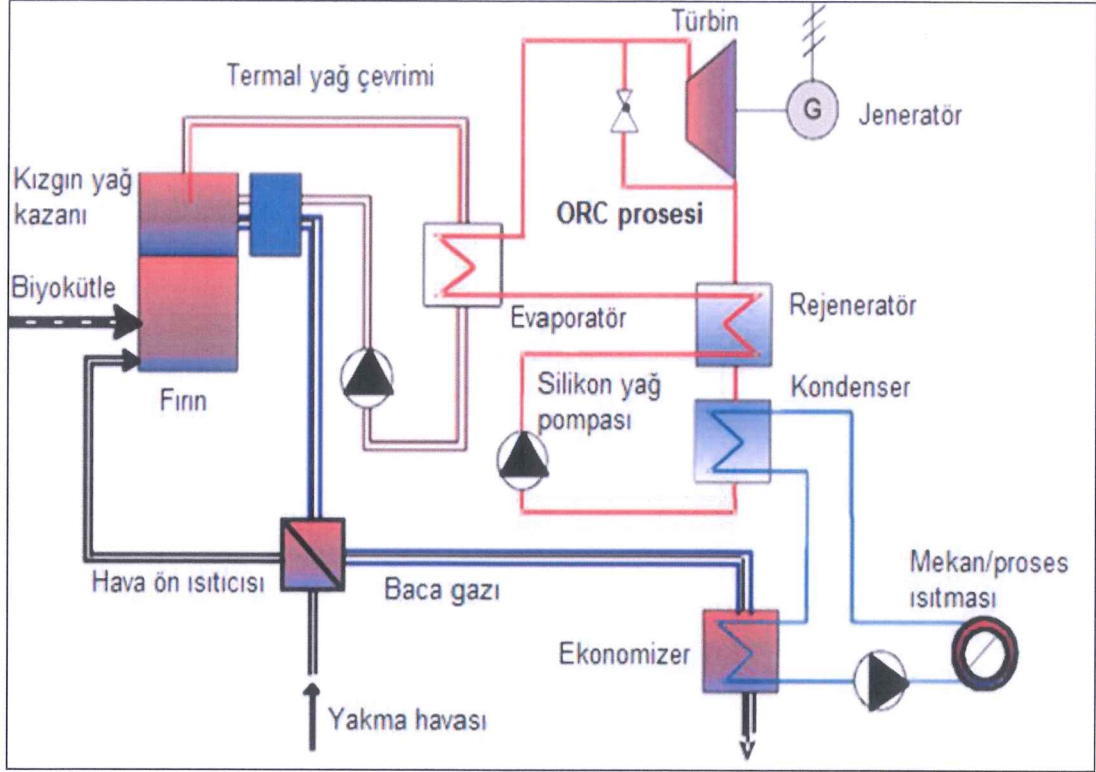
Bu sistemlerde elektrik üretmek, fotovoltaik pillerden daha ucuza mal olmaktadır. Ayrıca kondenser suyu farklı uygulamalarda kullanılabilir. Fakat yeterli güneşin olmadığı zamanlarda, sistem çalışmayacağı için bu tarz sistemler genellikle başka bir enerji kaynağı ile entegre edilerek (hibrit) çalıştırılmaktadır (biyokütle, fosil yakıtlı kazan, atık ısılar vb.) [1, 30].

4.6.4. Biyokütle Kaynaklı ORÇ Sistemleri

Biyokütle, bitkisel yağ atıkların, organik atıkların ve tarımsal hasat atıklarında dâhil olduğu, orman ve tarım ürünlerinden ve bu ürünlerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklardır. Birçok tarımsal veya endüstriyel proseste yaygın biçimde kullanılmaktadır. Diğer sitemlerden farklı olarak biyokütle yakılıp ısı elde edilerek termodinamik çevrimle elektriğe dönüşebilmektedir [24]. Biyokütle kaynaklı ORÇ uygulamalarından elde edilen ısı, endüstriyel proseslerde veya mekân ısıtılması amacıyla kullanılabilir [30].

Katı biyoyakıtlardan elektrik üretimi için başlıca rakip teknoloji biyokütle gazlaştırmasıdır. ORÇ sisteminde biyokütle kaynaklı ısı ve güç üretim sistemi, teknoloji ve maliyet bakımından gazlaştırma teknolojisiyle karşılaştırıldığında,

gazlaştırmanın daha yüksek yatırım ve daha yüksek bakım maliyeti olduğu görülebilir [30].



Şekil 4.13. Birleşik ısı ve güç üretim sistemlerinin şematik resmi [30].

4.7. ORÇ SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI

ORÇ, buhar türbin sistemleriyle kıyaslandığında, ORÇ' nin daha avantajlı olduğu gözlenir. Buhar türbini yüksek sıcaklık ve basınçta kullanıldığı için genellikle daha verimli olsada ORÇ sistemi aşağıda belirtilen kendine has bazı özellikler sebebiyle birçok uygulamada daha çok tercih edilmektedir.

1) ORÇ'de sıcak kaynak türbinler ile etkileşim olmaması nedeniyle, jeotermal sulardaki kirletici unsurların türbinler açısından riski yoktur. Flaş buharının jeotermal kaynaklardan buhar türbinlerine doğrudan geçmesiyle bu riskler buhar türbininde de ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla jeotermal suların temiz olmaması birtakım olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Söz konusu olumsuzlukların türbin

bıçaklarında meydana gelmesi yüksek bakım maliyetlerine neden olur. Bu yüzden hasar gören bıçakların düzenli periyotlarda yenilenmesi hayati önem taşımaktadır.

2) Buhar türbinindeki organik çalışma sıvısının moleküler ağırlığı oldukça yüksektir. Daha minimal olan yüksek hızlı buhar moleküllerin buhar türbinine yüksek hızla çarpması nedeniyle bıçakların zarar görmesi söz konusudur. Bu durum ilgili türbinin bakım, onarım ve yenileme periyodunu ve toplam maliyetini arttırmaktadır.

3) ORÇ'nin düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde çalışması amacıyla ilgili çalışma ortamında bir operatöre ihtiyaç bulunmamaktadır. Çünkü ORÇ herhangi bir personele gerek kalmaksızın otomasyon aracılığıyla uzaktan erişim sağlanarak kontrol edilip yönetilebilir. Bu sayede çalışma maliyetleri minimum seviyeye indirgenir [45].

4) ORÇ'nin düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde çalışması nedeniyle bileşenlerdeki mekanik ve termal gerilim, buhar türbinine nazaran oldukça düşüktür. Bu sayede söz konusu bileşenlerin ömrü uzamaktadır.

5) ORÇ kısmi yüklemelerde (nominal enerjinin %10'u gibi) dahi yüksek verimlilikle çalışabilmektedir. Özellikle bu durum, girdi ısısının sürekli devinim yaptığı bazı sanayi alanlarında ve Güneş-Termal uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Bu sayede yapılacak olan uygulamalar çalışma ortamında sabahın erken saatlerinde başlayıp akşamın geç saatlerine kadar işleyebilmektedir.

6) ORÇ'de çalışma sıvısı kullanılması nedeniyle su kullanılmasına gerek bulunmamaktadır. Buna ek olarak buhar sistemlerinde kullanılan mineralsiz su veya diğer yardımcı unsurlara gerek bulunmamaktadır. Böylelikle söz konusu sistemin tamamen çalıştırılması ve kontrolü çok daha kolaydır [45].

7) ORÇ'deki türbinin buhar türbinine nazaran daha düşük bir hızla dönmesi mekanik zorlanmayı da azaltmaktadır. Bu sayede, devir düşürücü dişli sistem ve buna bağlı ekipmanlar aracılığıyla direkt olarak türbin ile jeneratör arasında bağ kurulmasına yardımcı olmaktadır.

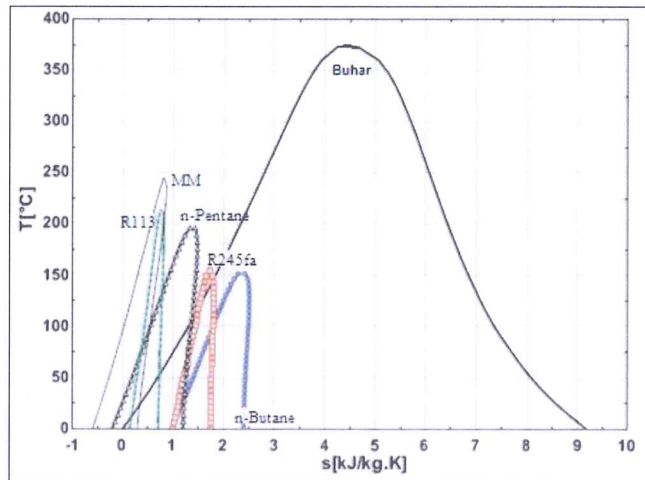
8) ORÇ sistemi kullanılarak daha yüksek türbin verimliliği (%85'e varıncaya kadar) elde edilebilmesi mümkündür.

9) Üretilen enerjinin düşük MW aralığında olduğu özel durumlarda ORÇ' nin buhar türbinine karşı daha ekonomik avantajı bulunmaktadır. Buhar türbini ek olarak çevresel bir sistem gerektirir, bu sistem maliyete eklenir. Bu da ekonomik anlamda yüksek boyutlar oluşturmaktadır [49].

10) Orta dereceli kaynak sıcaklıklı jeotermal enerji santralleri, düşük entalpi değerinden dolayı doğrudan buhar Rankine çevrimi ile birlikte kullanılamaz. Bu yüzden, bir Organik Rankine Çevirim (ORÇ) sistemi ile çalışan ikili çevirimden yararlanmaktadır [50].

4.8. ORÇ SİSTEMLER İÇİN ÇALIŞMA SIVISININ SEÇİLMESİ

Düşük sıcaklıklarda ısı transfer verimsizliği önemli olduğundan, bu sıcaklıklardaki uygulamalarda kullanılacak çalışma sıvısının seçimi oldukça kritiktir. Isı verimsizlikleri, sıvının termodinamik özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlıdır. Düşük kalitede ısı elde etmek için sıvının sudan daha düşük kaynama seviyesine sahip olması gerekir. Aşağıda Şekil 4.14' te bazı organik akışkanlar ile su buharına ait T-S diyagramları verilmiştir [1].



Şekil 4.14. Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı [1].

Sıvının bazı önemli özellikleri aşağıdaki gibidir [1,36,45].

- Eğer düşük sıcaklık da çalışan bir ORÇ sistemi gerekiyorsa düşük kaynama noktasına sahip bir akışkan tercih edilebilir. Bununla beraber düşük bir yoğunlaşma sıcaklığı gerekebilir.
- Soğutucu akışkanın donmasını önlemek için düşük donma noktası tercih edilir;
- Nispeten özgül ısı kapasitesi daha düşük bir akışkan seçilmelidir konsendere sıvı yürümesi olayını önlemek için.
- Yüksek basınç ve sıcaklıktaki ORÇ akışkanları genellikle kimyasal bozulma ve ayrışma görülür. Bu durumda çalışma sıvısını seçerken göz önüne alınması gerekir.
- Buharlaşma gizli ısısı yüksek olan akışkan buharlaşma sırasında daha fazla ısıyı absorbe edebilir. Bu yüzden buharlaşma gizli ısısı yüksek olan akışkanla çalışan bir sistem de atık ısıdan yararlanarak sistem verimliliği artırılabilir.
- Çalışma akışkanını seçerken ozon delme potansiyeli (ODP) ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) göz önüne alınarak seçilmelidir.
- Düşük toksiteye sahip akışkan seçilmelidir.
- Güvenlik açısından tahriş edici, sıvı, yanıcı olmamalıdır.

Organik Rankine Çevriminde çalışma akışkanı çok önemli bir rol oynamaktadır. Sistemin performansını ve ekonomisini belirler. Bu gerekçelerle farklı ısı geri kazanım uygulamalarında iyi bir akışkana sahip olmak için literatürde bir çok çalışma yapılmıştır [1].

- Sıfır veya pozitif eğimli doyma eğrisi (ds/dt)
- Buharlaşma gizli ısısı
- Yüksek yoğunluk (sıvı/buhar fazı)
- Yüksek özgül ısı
- Uygun kritik parametreler (sıcaklık, basınç)
- Kabul edilebilir yoğunlaşma ve buharlaşma basıncı (>1 bar ve <25 bar)
- İyi ısı transfer özellikleri (düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik)
- İyi termal ve kimyasal kararlılık (yüksek sıcaklıklarda stabil olması)

- Malzemeler ile uyumlu olması (çürütücü değildir).
- Yüksek termodinamik performans (yüksek enerjetik/ ekserjetik verim)
- Güvenlik karakteristiğinin iyi olması (zehirsiz ve yanıcı olmaması)
- Düşük maliyet ve iyi derecede uygulanabilirlik.

ORÇ teknolojisi 1880'lerde keşfedilmesine rağmen günümüze kadar popüler bir sistem olamamıştır. Fosil kökenli kaynakların azalması ve dünya genelinde çevreye verilen zarar insanları düşük enerjili geri kazanım sistemlerine yöneltmiştir. Düşük çalışma sıcaklığı sayesinde ORÇ sistemleri çeşitli ısı geri kazanım sistemleri ile uygun olarak kullanılabilir. Bunlar güneş enerjisi, jeotermal enerji, endüstriyel atık ısılar vb. dir. Bu tarz tesisler ABD, Kanada, İtalya, Avusturya, Almanya, Hollanda, İsviçre ve diğer ülkeler tarafından birçok yerde test edilip kullanılmaktadır [36].

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METODLAR

5.1. TERMODİNAMİK ANALİZ

Yaptığımız bu çalışmada, sistem performansını belirlemek, sistemde verimsiz çalışan ekipmanları tespit edebilmek için termodinamik analizlerin yapılması gerekmektedir.

Sistemin performansını belirlemek için soğutucu akışkanın debisi bilinmesi gerekir. Sistemde evaporatörden geçen iki farklı akışkanın ısı alış verişi olayında alınan ısı daima verilen ısıya eşit olur. Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 ile ifade edilir. Soğutucu akışkanın debisi bu eşlenikleri kullanılarak hesaplanır [1].

$$Q_{su} = Q_{oa} \quad (5.1)$$

$$m_{su} \times c_{p_{su}} \times \Delta T_{su} = m_{oa} \times c_{p_{oa}} \times \Delta T_{oa} \quad (5.2)$$

Sisteme giren enerji kazanda elde edilen sıcak suyun giriş ve çıkışındaki entalpi farkı ve kütleli debinin çarpımına eşittir. Bu durum eşitlik 5.3'de görülmektedir.

$$Q_{giren} = m_{sıcak,su} \times (h_1 - h_2) \quad (5.3)$$

Sistemden elde edilen mekanik iş, türbin işine eşittir ve aşağıdaki eşitlik 5.4 ile gösterilmiştir.

$$W_{türbin} = m_{oa} \times (h_4 - h_5) \quad (5.4)$$

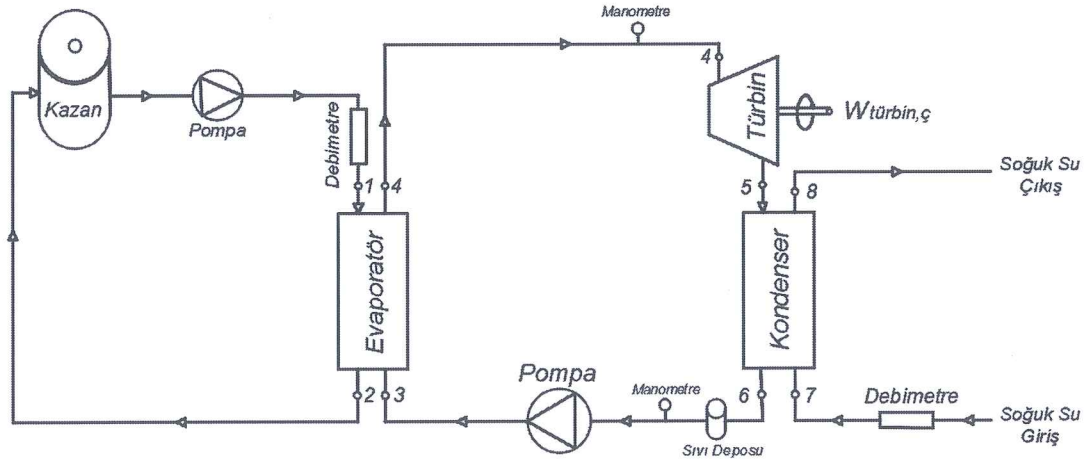
Sistemden elde edilen net iş (\dot{W}_{net}), türbinde elde edilen güçten, pompa güçlerinin çıkarılmasıyla hesaplanır. Sistemde kullanılan pompaların güçleri 300 ve 50

watt olarak katalog değerlerinden alınmıştır. Bu değer bize enerji verimleri hesaplanırken kullanılacak net gücü gösterir ve Eş. 5.5 ile hesaplanır.

$$W_{net} = W_{türbin} - W_{pompa} \quad (5.5)$$

$$\eta_{Termal} = \frac{W_{net}}{Q_{giren}} \quad (5.6)$$

Bu çalışmada, organik rankine çevrimi prensibine göre çalışan bir sistem tasarlanıp imal edilmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılan sistemin, çalışma prensibi şekil 5.1.'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Tasarımı yapılan sistemin şematik gösterimi.

Şekilde görüldüğü gibi sistemin ısı kaynağı elektrikle ısıtılan küçük bir kazandır. Bu kazandan yaklaşık 90°C de sıcak su elde edilir. Kazandan temin edilen sıcak su sıvı pompası yardımıyla sistemde kullanılan evaporatöre gönderilir. Evaporatöre gönderilen sıcak su burada enerjisini organik akışkana vererek kazana geri döner ve sıcak su pompasıyla sistemin devamlılığı sağlanır.

Aynı zamanda organik akışkanın evaporatörden geçerken sıcaklığı ve basıncı arttırılır. Yüksek sıcaklık ve basınçta türbine giren organik akışkan türbini hareket ettirerek mekanik iş elde eder. Bu mekanik iş de jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür.

Ardından organik akışkan kondensere girerek soğutma suyu ile ısı alışverişine girer ve sıvı hale geçip pompaya gelir. Pompa aracılığıyla sistemin sürekliliği sağlanmış olur.



Şekil 5.2. Hazırlanan ORÇ deney düzeneği.



Şekil 5.3. Hazırlanan ORÇ deney düzeneği-2.

5.2. KULLANILAN EKİPMANLAR

Kurulan sistemde kullanılan ekipmanlar; ana elemanlar, bağlantı elemanları ve ölçüm elemanları olmak üzere 3 kısma ayrılır.

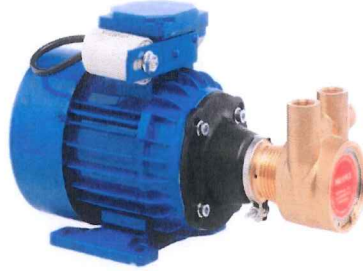
5.2.1. Ana Elemanlar

Türbin: Termal enerjinin mekanik enerjiye dönüştüğü yer türbinlerdir. Genel olarak yüksek hızlı, çok kademeli, radyal veya karışık akışlı üniteler yüksek türbin verimliliği sağlarlar [5]. Buharlaştırıcıdan kızgın buhar olarak açığa çıkan organik akışkan, türbin kanatçıklarına çarparak mekanik iş elde edilir. Bu çalışmada ORÇ sisteminde elektrik elde etmek için türbin yerine 1 adet otomobil scroll kompresör kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Türbin.

Pompa: Kurulan sistemde, kondenserden çıkan sıvı fazdaki organik akışkanın basınçlandırılması, evaporatöre gönderilmesi ve sistemin dolaşımının sağlanabilmesi için 1 adet manyetik nuert marka pompa kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Pompa.

Isı Değiştiriciler: Isı değiştiricileri (esanjörler), farklı sıcaklıkta ve birbirlerinden katı bir cidar ile ayrılan iki akışkan arasındaki ısı geçişini sağlamak için kullanılan cihazlardır. Bir ısı değiştiricisinin tasarımının ve performansının belirlenebilmesi, ısı değiştiricisinin bağımsız olarak sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki ortalama logaritmik sıcaklık farkına, yüzey alanına ve ısı geçiş katsayısına bağlıdır. Jeotermal uygulamalarda kullanılacak ısı değiştiricilerinin seçiminde en büyük faktör, sistemde kullanılacak akışkanın kimyasal yapısı ve sıcaklığıdır [5]. Sistemde organik akışkanı yüksek sıcaklık ve basınca çıkarabilmek için evaporatör olarak kullanılacak ve türbinden çıkan organik akışkanın sıcaklığını düşürmek için kondanser görevi görecektir 2 adet 24 plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır



Şekil 5.6. Isı değiştiriciler.

Sıvı Pompası: Kurulan sistemde, kazandan elde edilen sıcak suyu evaporatöre göndermek ve evaporatörden çıkan sıcak suyun kazana dönmesini sağlamak için 1 adet manyetik çamaşır makinesi pompa kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Çamaşır makinesi pompası.

Kazan: Kurulan olan sistemde, hem sistemin ısı kaynağı olması hemde sıcak su elde edilebilmesi için elektrikle ısıtılan küçük bir kazan tasarlanmıştır.



Şekil 5.8. Elektrik ısıtıcılı kazan.

Sıvı Deposu (Receiver): Kurulan sistemde, organik akışkanı sıvı olarak depolamak, takviye etmek ve eksilmek ve sistemde vakum gibi işlemlerin yapılabilmesi için 1 adet sıvı deposu kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Sıvı deposu.

5.2.2. Bağlantı Ekipmanları

Sistemin organik akışkan ile oluşturulacak kısmı için bakır boru, organik akışkan (R134a-R22) ve bu akışkanlara uygun 2 adet manometre, 2 adet gözetleme camı, 1 adet termostat ve fittingsler, eşanjörlerle sağlanacak ısıtma-soğutma kısımlarını oluşturmak için ise plastik boru ve fittingsler kullanılmıştır.

Manometre: Kurulan sistemde, organik akışkanın alçak ve yüksek basınçlarını ölçmek için 2 adet manometre kullanılmıştır.



Şekil 5.10. Manometre.

Gözetleme Camı: Kurulacak olan sistemde, organik akışkanın sıvı fazda olup olmadığı, akışkan miktarının yeterli olup olmadığı ve sistemin çalışmasına dikkat etmek amacıyla 2 adet gözetleme camı kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Gözetleme camı.

Termostat: Kurulacak olan sistemde, kazandan elde edilen sıcak suyun sıcaklığını istenilen derece sabit olmasını sağlamak amacıyla 1 adet termostat kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Termostat.

Debimetre: Kurulacak olan sistemde, kazandan elde edilen sıcak suyun ve soğutma suyunun hacimsel debisini ölçmek amacıyla 2 adet debimetre kullanılmıştır.



Şekil 5.13. Debimetre.

5.2.3. Ölçüm Elemanları

Sistemde elde edilen elektriği ölçmek için bir voltmetre ve belirli noktalarda sıcaklık ölçümü yapabilmek için K tipi termokupl, PİKOLOG marka data logger cihazı kullanılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. KULLANILAN ORGANİK AKIŞKANLAR

R22: (CHClF₂) formüllü, yanmayan zehirsiz, patlamayan bir akışkandır. R22 akışkanı, soğutma uygulamalarında kullanılmak için geliştirilmiş soğutucu akışkandır. Paket tipi klima cihazlarda, ev tipi ve ticari tip soğutucularda daha kompakt kompresör gerektirmesi ve yer kazancı sağlaması yönünden tercih edilir. Soğutma uygulamalarında, yüksek sıkıştırma oranıyla çıkış sıcaklıkları ile karşılaşılabileceğinden silindirlerin su gömlekli olması tavsiye edilir [47].

R134a: (CF₂CH₂F), ozon tüketme katsayısı 0 olan ve diğer özellikleri açısından en uygun soğutucu maddedir. Ev tipi soğutucular ve araç soğutucuları için en uygun akışkandır. Ticari olarak temini olanaklı olup düşük sıcaklık için çift kademeli sıkıştırma işlemi gerekmektedir. R134a akışkanı, mineral yağlarla uyumlu olmadığı için poli - olester veya poliolalkalinglikol bazlı yağlarla kullanılmalıdır [47].

Bu çalışmada ORÇ çevrimi sistemi deney düzeneğinde iki farklı akışkan (R134a-R22) ile yapılmıştır. Kullanılan akışkanlar ayrı ayrı denenmiş ve belirli zaman aralığında veriler toplanarak termodinamik analizler ile hesaplama yapılmıştır. İki farklı akışkana göre toplanan bu veriler aşağıda gösterilmiştir.

6.2. R134a ORGANİK AKIŞKANINA GÖRE 10 DAKİKALIK ARAYLA ALINMIŞ VERİ DEĞERLERİ

Çizelge 6.1. R134a organik akışkan için hesaplanmış veriler (Birinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 1	1	Evaporatör Giriş	Su	81	1	0,1972	339,2	66,9
	2	Evaporatör Çıkış	Su	66,5	1	0,1972	278,4	54,9
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R134a	31,8	12	0,2897	244,1	70,7
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R134a	69,5	12	0,2897	448,3	129,9
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R134a	59,1	12	0,2897	436,3	126,4
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R134a	29,2	9	0,2897	240,3	69,6
	7	Kondanser giriş	Su	17,5	1	0,2083	73,5	15,3
	8	Kondanser çıkış	Su	22,2	1	0,2083	93,2	19,4

Çizelge 6.2. R134a organik akışkan için hesaplanmış veriler (İkinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 2	1	Evaporatör Giriş	Su	77,5	1	0,1972	324,6	64,1
	2	Evaporatör Çıkış	Su	68,9	1	0,1972	288,8	56,9
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R134a	31,6	12	0,1651	243,7	40,2
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R134a	70,5	12	0,1651	449,5	74,2
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R134a	51,7	12	0,1651	427,5	70,6
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R134a	30,5	8,2	0,1651	242,2	40,1
	7	Kondanser giriş	Su	19,7	1	0,2083	82,8	17,2
	8	Kondanser çıkış	Su	26,3	1	0,2083	110,5	23,1

Çizelge 6.3. R134a organik akışkan için hesaplanmış veriler (Üçüncü 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 3	1	Evaporatör Giriş	Su	82,9	1	0,1972	347,4	68,5
	2	Evaporatör Çıkış	Su	76,1	1	0,1972	319,1	62,9
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R134a	33,3	12	0,1159	246,8	28,6
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R134a	77,8	12	0,1159	457,7	53,1
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R134a	59,5	12	0,1159	436,9	50,6
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R134a	30,3	8,2	0,1159	241,9	28,1
	7	Kondanser giriş	Su	18,3	1	0,2083	76,9	16,1
	8	Kondanser çıkış	Su	23,4	1	0,2083	98,2	20,4

Çizelge 6.4. R134a organik akışkan için hesaplanmış veriler (Dördüncü 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 4	1	Evaporatör Giriş	Su	90,8	1	0,1972	380,4	75,1
	2	Evaporatör Çıkış	Su	82,6	1	0,1972	346,1	68,2
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R134a	30,2	12	0,1252	241,8	30,2
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R134a	80,2	12	0,1252	460,5	57,6
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R134a	53,2	12	0,1252	429,4	53,7
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R134a	29,1	8,2	0,1252	411,1	51,4
	7	Kondanser giriş	Su	20,7	1	0,2083	87,2	18,1
	8	Kondanser çıkış	Su	27,1	1	0,2083	113,8	23,7

Çizelge 6.5. R134a organik akışkan için hesaplanmış veriler (Beşinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 5	1	Evaporatör Giriş	Su	82,3	1	0,1972	344,8	68,1
	2	Evaporatör Çıkış	Su	75,1	1	0,1972	314,7	62,1
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R134a	29,5	12	0,1151	240,8	27,7
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R134a	76,9	12	0,1151	456,7	52,5
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R134a	63,8	12	0,1151	441,8	50,8
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R134a	27,8	7,8	0,1151	238,3	27,4
	7	Kondanser giriş	Su	18,1	1	0,2083	76,09	15,8
	8	Kondanser çıkış	Su	24,8	1	0,2083	104,2	21,7

6.3. R22 ORGANİK AKIŞKANINA GÖRE 10 DAKİKALIK ARAYLA ALINMIŞ VERİ DEĞERLERİ

Çizelge 6.6. R22 organik akışkan için hesaplanmış veriler (Birinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 1	1	Evaporatör Giriş	Su	86,6	1	0,1805	363	65,5
	2	Evaporatör Çıkış	Su	80,9	1	0,1805	338,9	61,1
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R22	28,5	12	0,1276	234,7	29,9
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R22	80,9	12	0,1276	456,7	58,2
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R22	59,5	12	0,1276	439,2	56,1
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R22	27,1	10	0,1276	232,9	29,7
	7	Kondanser giriş	Su	18,3	1	0,2083	77,1	16,1
	8	Kondanser çıkış	Su	22,7	1	0,2083	95,4	19,8

Çizelge 6.7. R22 organik akışkan için hesaplanmış veriler (İkinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 2	1	Evaporatör Giriş	Su	88,4	1	0,1805	370,5	66,9
	2	Evaporatör Çıkış	Su	82,8	1	0,1805	346,9	62,6
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R22	27,4	13	0,1266	233,3	29,5
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R22	79	13	0,1266	453,9	57,4
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R22	57,1	13	0,1266	435,8	55,1
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R22	26,1	10	0,1266	231,7	29,3
	7	Kondanser giriş	Su	18,3	1	0,2083	76,9	16,1
	8	Kondanser çıkış	Su	23,1	1	0,2083	97,1	20,2

Çizelge 6.8. R22 organik akışkan için hesaplanmış veriler (Üçüncü 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
Deney 3	1	Evaporatör Giriş	Su	90,5	1	0,1805	379,2	68,4
	2	Evaporatör Çıkış	Su	85,6	1	0,1805	358,6	64,7
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R22	26,6	12,5	0,1076	232,4	25,1
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R22	79,7	12,5	0,1076	455,1	48,9
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R22	52,6	12,5	0,1076	432,8	46,5
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R22	25,1	10	0,1076	230,5	24,8
	7	Kondanser giriş	Su	18,5	1	0,2083	78,1	16,2
	8	Kondanser çıkış	Su	23,1	1	0,2083	97,1	20,2

Çizelge 6.9. R22 organik akışkan için hesaplanmış veriler (Dördüncü 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
D deney 4	1	Evaporatör Giriş	Su	90,3	1	0,1805	378,4	68,3
	2	Evaporatör Çıkış	Su	84,3	1	0,1805	353,4	63,8
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R22	25,1	12,5	0,1213	230,4	27,9
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R22	81,8	12,5	0,1213	456,8	55,4
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R22	57,8	12,5	0,1213	437,1	53,1
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R22	24,2	10	0,1213	229,3	27,8
	7	Kondanser giriş	Su	18,2	1	0,2083	76,7	15,9
	8	Kondanser çıkış	Su	22,8	1	0,2083	95,8	19,9

Çizelge 6.10. R22 organik akışkan için hesaplanmış veriler (Beşinci 10 dakikada).

Aşama	Nokta	Tanım	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)
D deney 5	1	Evaporatör Giriş	Su	89,7	1	0,1805	376,1	67,9
	2	Evaporatör Çıkış	Su	84,9	1	0,1805	355,7	64,2
	3	Evaporatör Giriş-Pompa çıkış	R22	27,1	13	0,1076	233,1	25,1
	4	Evaporatör Çıkış-Türbin Giriş	R22	79,4	13	0,1076	454,3	48,9
	5	Türbin Çıkış-Kondanser giriş	R22	56,8	13	0,1076	435,6	46,9
	6	Kondanser çıkış - Pompa giriş	R22	26,1	10	0,1076	231,7	24,9
	7	Kondanser giriş	Su	18,8	1	0,2083	79,1	16,4
	8	Kondanser çıkış	Su	23,4	1	0,2083	98,2	20,4

BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI

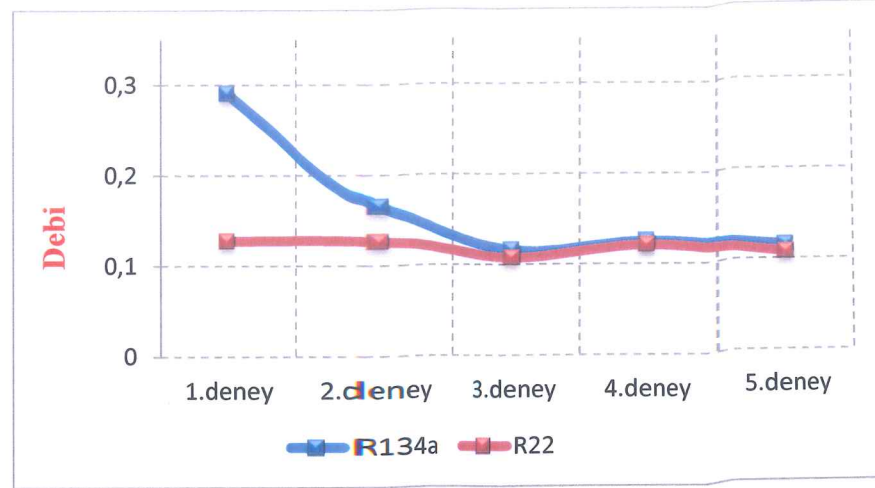
Yaptığımız bu çalışmada R134a ve R22 akışkanlarına göre deneysel çalışma yapılmış bu akışkanlar için ayrı ayrı veriler toplanmıştır. Toplanan verilerle termodinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen değerler tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

Çizelge 7.1'de hesaplanan organik akışkan debileri görülmektedir.

Çizelge 7.1. R134a ve R22 akışkanlarının debi değerleri.

Debiler kg/s	R134a	R22
1.deney	0,28975	0,127635449
2.deney	0,165192486	0,126605314
3.deney	0,115970101	0,107650324
4.deney	0,125210725	0,121300296
5.deney	0,115153247	0,107690715

Çizelge 7.1'deki değerler Şekil 7.1'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.1. R134a ve R22 akışkanlarının debi değerleri.

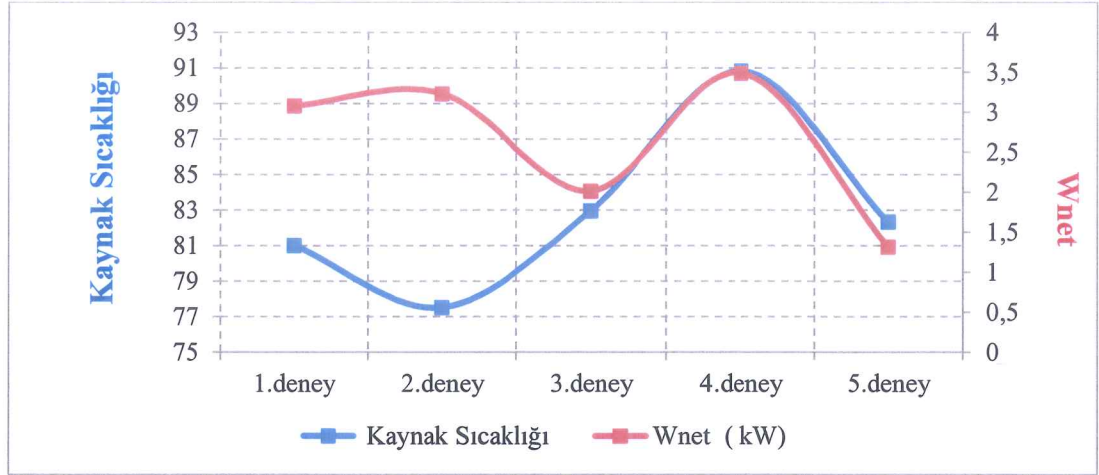
Şekil 7.1'de görüldüğü üzere, her bir deney ve akışkanlar için kütleli debi karşılaştırılması yapılmıştır. R134a akışkanı için daha yüksek debi değerlerinin olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.2'de hesaplanan R134a akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.2. R134a akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

R134a	Kaynak Sıcaklığı (°C)	W_{net} (kW)
1.deney	81	3,0778
2.deney	77,51	3,2296
3.deney	82,94	2,0126
4.deney	90,81	3,4869
5.deney	82,33	1,3180

Çizelge 7.2' deki değerler Şekil 7.2. 'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.2. R134a akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

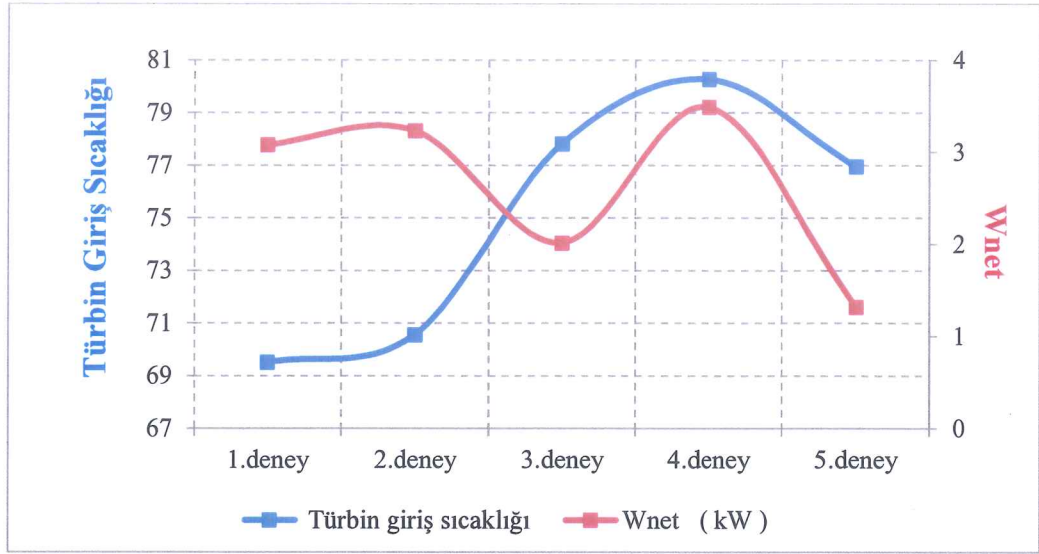
Şekil 7.2' de kaynak sıcaklığına bağlı olarak üretilen net işin değişimi görülmektedir. Her iki akışkan içinde kaynak sıcaklığı arttıkça net işinde arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 7.3.'de hesaplanan R134a akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.3. R134a akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

R134a	Türbin giriş sıcaklığı (°C)	Wnet (kW)
1.deney	69,5	3,07786925
2.deney	70,55	3,229675371
3.deney	77,81	2,012641983
4.deney	80,26	3,486916529
5.deney	76,94	1,318086447

Çizelge 7.3' deki değerler Şekil 7.3.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.3. R134a akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği net enerji değerleri.

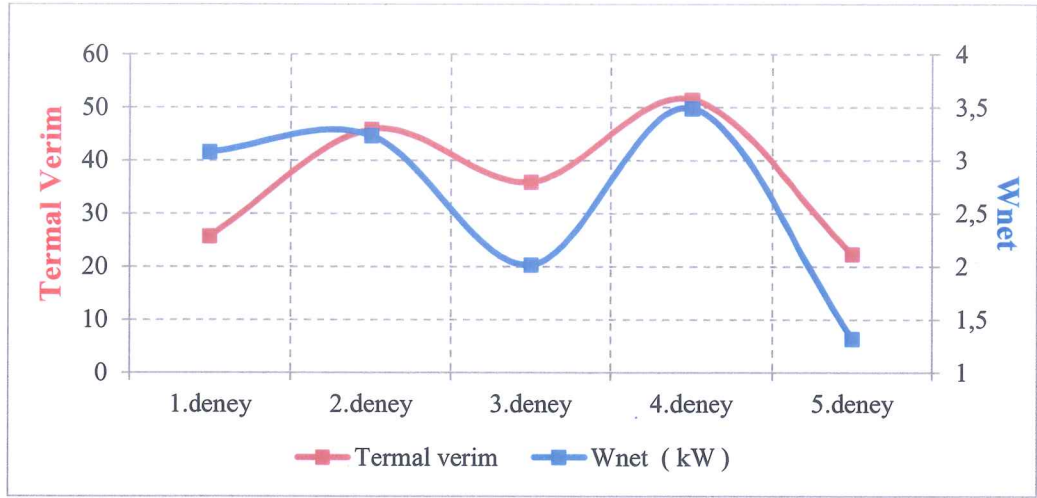
Şekil 7.3'te güç üreten sistemlerde çok önemli bir parametre olan türbin giriş sıcaklığının net işe etkisini gösteren grafik görülmektedir. Kaynak sıcaklığına benzer bir şekilde türbin giriş sıcaklığı arttıkça net işte artmaktadır.

Çizelge 7.4.'de hesaplanan R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri görülmektedir.

Çizelge 7.4. R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri.

R134a	Wnet (kW)	Termal verim (%)
1. deney	3,07786925	25,7
2. deney	3,229675371	45,8
3. deney	2,012641983	35,9
4. deney	3,486916529	51,4
5. deney	1,318086447	22,3

Çizelge 7.4' deki değerler Şekil 7.4.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.4. R134a akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri.

Şekil 7.4 te R134a akışkanı ile yapılan deneylerde türbinden elde edilen net iş ve termal verimin karşılaştırılması görülmektedir. Net iş arttıkça termal verimde buna bağlı olarak artmaktadır.

Çizelge 7.5.'de hesaplanan R22 akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.5. R22 akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

R22	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Wnet (kW)
1.deney	86,67	1,827876768
2.deney	88,46	1,888137842
3.deney	90,53	1,996834455
4.deney	90,32	1,991920544
5.deney	89,78	1,606105716

Çizelge 7.5'deki değerler Şekil 7.5.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.5. R22 akışkanının kaynak sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

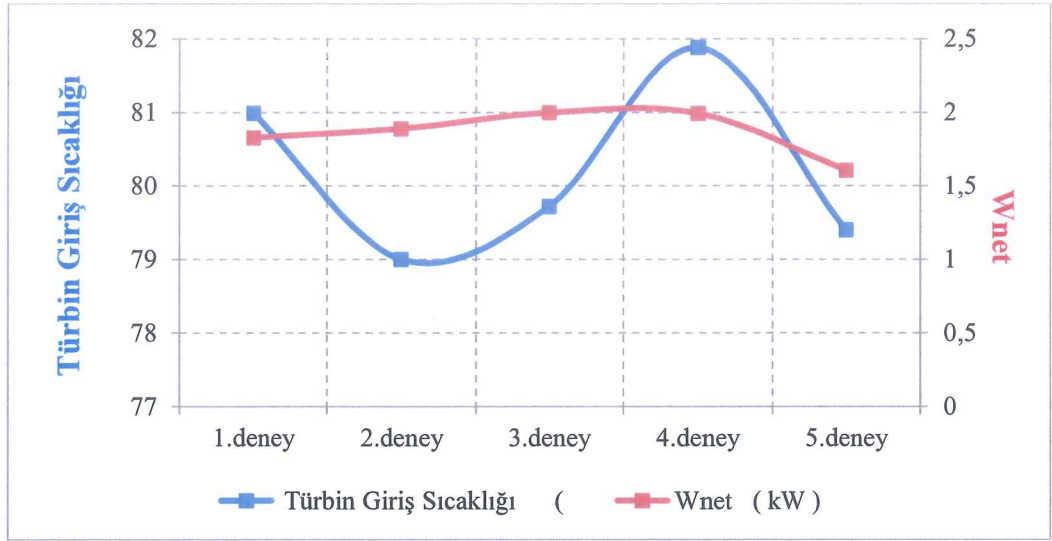
Şekil 7.5' te R22 akışkanı ile yapılan deneylerdeki kaynak sıcaklığı-net iş değişimi görülmektedir. Kaynak sıcaklığına bağlı olarak net işte artmaktadır.

Çizelge 7.6.'de hesaplanan R22 akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.6. R22 akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

R22	Türbin Giriş Sıcaklığı (°C)	Wnet (kW)
1.deney	80,99	1,827876768
2.deney	79	1,888137842
3.deney	79,72	1,996834455
4.deney	81,88	1,991920544
5.deney	79,4	1,606105716

Çizelge 7.6' deki değerler Şekil 7.6.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.6. R22 akışkanının türbin giriş sıcaklığına bağlı ürettiği enerji değerleri.

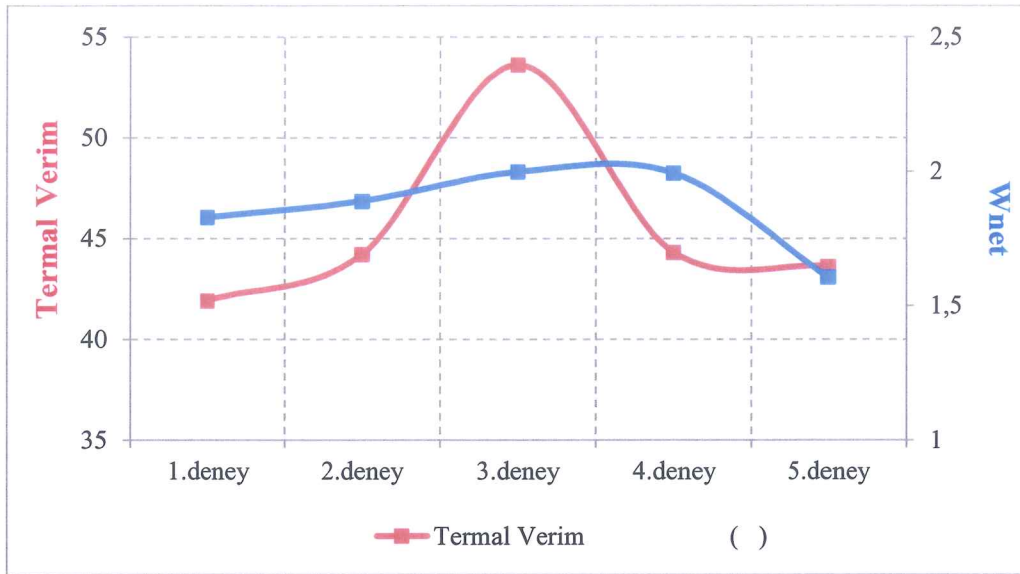
Şekil 7.6' da türbin giriş sıcaklığının net işe olan etkisini gösteren grafik görülmektedir. Kaynak sıcaklığına bağlı olarak türbin giriş sıcaklığı arttıkça net işte artmaktadır.

Çizelge 7.7.'de hesaplanan R22 akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri görülmektedir.

Çizelge 7.7. R22 akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri.

R22	Wnet (kW)	Termal Verim (%)
1.deney	1,827876768	41,9
2.deney	1,888137842	44,2
3.deney	1,996834455	53,6
4.deney	1,991920544	44,3
5.deney	1,606105716	43,6

Çizelge 7.7'deki değerler Şekil 7.7.'de grafiksel olarak verilmiştir.



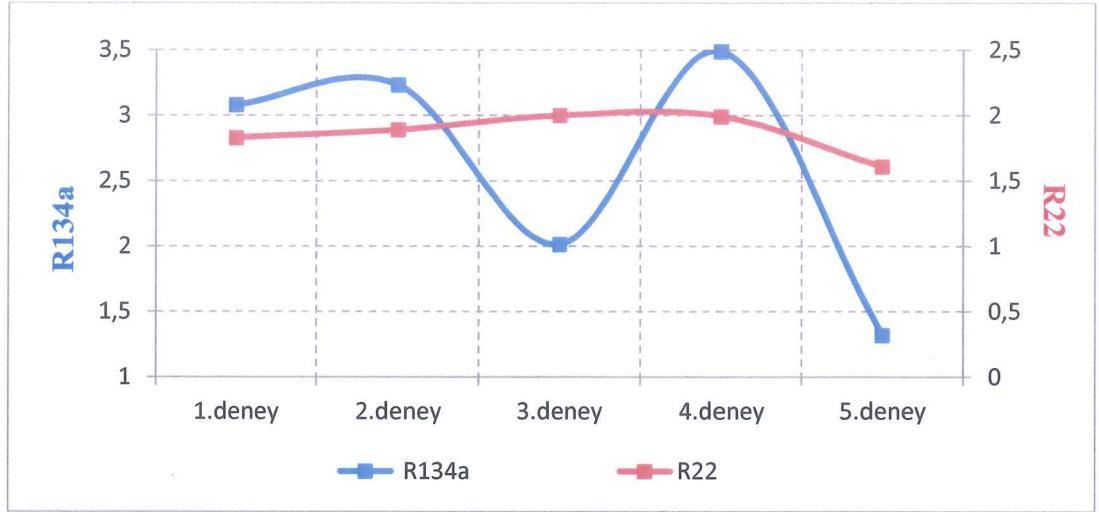
Şekil 7.7. R22 akışkanının türbinden ürettiği enerjiye bağlı termal verimleri.

Çizelge 7.8.'de R134a – R22 akışkanların türbinden ürettiği net enerjilerin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 7.8. R134a – R22 akışkanların türbinden ürettiği net enerjilerin karşılaştırılması.

Wnet	R134a	R22
1.deney	3,07786925	1,827876768
2.deney	3,229675371	1,888137842
3.deney	2,012641983	1,996834455
4.deney	3,486916529	1,991920544
5.deney	1,318086447	1,606105716

Çizelge 7.8' deki değerler Şekil 7.8.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.8. R134a – R22 akışkanının türbinden ürettiği net iş karşılaştırılması.

Şekil 7.8 de görüldüğü üzere R134 a akışkanıyla daha yüksek güç değerleri elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 7.9.'de R134a – R22 akışkanının termal verimlerinin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 7.9. R134a – R22 akışkanının termal verimlerinin karşılaştırılması.

Termal verim	R134a	R22
1.deney	25,7	41,9
2.deney	45,8	44,2
3.deney	35,9	53,6
4.deney	51,4	44,3
5.deney	22,3	43,6

Çizelge 7.9' deki değerler Şekil 7.9.'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.9. R134a – R22 akışkanının termal verimlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.9’ da R22 akışkanının R134a akışkanına göre daha verimli çalışma koşulları sağladığı açıkça görülmektedir. R134a akışkanı ile daha yüksek güç değerleri elde edilmesine rağmen R22 akışkanı daha verimli çalışmaktadır.

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemiz gelişim gösteren ülkeler arasında yer almakta ve gün geçtikçe enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bugün dünyada kullanılabilen enerji kaynakları; başta fosil kökenli kaynaklar, hidrolik ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak bilinen rüzgâr, güneş, dalga ve jeotermal enerjidir. Yapılan bu tez çalışmasındaki deneysel veriler sonucunda elde edilen bulgular şunlardır;

8.1. SONUÇLAR

- ORÇ prensibiyle çalışan atık ısı kazanımlı ve jeotermal sistemler sürekli elektrik üretimi için oldukça uygundur. Bu kaynakların kullanılması ülkemiz enerji ihtiyacı için güçlü bir alternatif çözümdür.
- ORÇ sistemlerinde kaynak sıcaklığı son derece önemlidir. Kaynak sıcaklığı ne kadar yüksek olursa üretilen net iş ve verimin yükseldiği açıkça görülmektedir.
- Kaynak sıcaklığının yanı sıra organik akışkanın türbine giriş sıcaklığında en kritik parametrelerden biridir. Kaynak sıcaklığının organik akışkana mümkün olduğu kadar az kayıpla aktarılması sistemin verimi arttıracaktır. Bu nedenle evaporatör olarak kullanılan ısı değiştiricinin tasarımı da oldukça büyük önem taşımaktadır.
- Sistemde kullanılan R22 gazının daha verimli çalışma koşulları sağladığı görülmektedir. Ancak, R134a gazı ile yapılan deneylerde, daha yüksek net iş elde edilmiştir. R22 gazı sisteme sarj edilirken yüksek basınç değerlerine çıkılamamıştır, bu nedenle bu gazın verimi yüksek olsa bile, düşük güç değerleri elde edilmiştir.

8.2. ÖNERİLER

- ORÇ sistemlerinin karşılaştırılması yapılırken sadece termal verimin hesaplanması yeterli değildir. Bunun yanı sıra ekserji veriminde hesaplanması daha doğru sonuçlar verebilir. İleriki çalışmalarda termal analizle beraber ekserji analizinin hatta termoeekonomik analizin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ergün, A., “Organik rankine çevrimi prensibine göre çalışan bir jeotermal elektrik santralinin termoeconomik analizi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2014).
2. Yalçınkaya, R. ve Bıykoğlu, A., “Kritik-Üstü karbon-dioksitin jeotermal güç çevriminde kullanımı üzerine”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (3): 557-558, (2012).
3. Arslan, O., “Kütahya-Simav jeotermal kaynaklarının hassas değerlendirmesi: Entegre sistem tasarımı ve enerji- ekserji analizleri”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2008).
4. Arslan, O., Köse, R., Alakuş, B. and Özgür, A.M., “Examining of power generation potential in simav geothermal field”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Kütahya, Issn 1302- 3055, (2016).
5. Tamyerli, U., “Jeotermal enerjiden elektrik üretiminin irdelenmesi: Örnek Çalışma: Kütahya – Simav jeotermal sahası”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2007).
6. Cihan, E., “ Organik ankine çevrimi ile çalışan atık ısı kaynaklı bir soğutma sisteminin performansının araştırılması”, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, 34(1): 101-109, (2014).
7. Kanoğlu, M., "Jeotermal elektrik üretim sistemleri ve kojenerasyon", *Jeotermal Enerji Semineri*, İzmir, 289-299, (2011).
8. Kara, Y.A. and Yuksel, B., “Evaluation of low temperature geothermal energy the use of heat pump”, *Energy Conversion and Management*, 42: 773-781, (2001).
9. Kayabaşı, R., “Jeotermal enerji kullanılarak termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2009).
10. Dipippo R., “Second Law assessment of binary plants generating power fromn lowtemperature geothermal fluids”, *Geothermics*, 33: 565–586, (2004).
11. Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M. and Fischer, J., “Working fluids for low- temperature organic rankine cycles”, *Energy*, 32 (7): 1210 – 1221, (2007)
12. Schuster, A., Karellas, S. and Aumann, R., “Efficiency optimization potential in supercritical organic rankine cycles”, *Energy*, 1 –7, (2009).

13. Yari, M., "Exergetic analysis of various types of geothermal power plants", *Renewable Energy*, 35 (1): 112 – 121, (2010).
14. Kökçe, M., "Mevcut bir jeotermal güç santralinin alternatif bir ikincil akışkan için performansının araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2010).
15. Aydın, N. ., "Termik santralde buharlaştırmalı yoğuşturucu kullanımının verim artışına etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2010).
16. Tchanche B.F., Papadakis, G, Lambrinos, G. and Frangoudakis, A., "Fluid selection for a low-temperature solar organic rankine cycle", *Applied Thermal Engineering*, 29 (11-12): 2468-2476, (2009).
17. Coşkun, C., "Jeotermal enerji kaynaklı birleşik ısı-g  sistemlerinin termodinamik analizi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2011).
18. Kanoglu, M. and Bolatturk, A., "Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy", *Renewable Energy*, 33 (11): 2366, (2008).
19. Kanoğlu, M. and Cengel Y.A., "Economic evaluation of geothermal power generation, heating and cooling", *Energy*, 24 (6): 501, (1999).
20. Sun, J. and Li ,W., "Operation optimization of an organic rankine cycle (OR). Heat recovery power plant", *Applied Thermal Engineering*, 31 (11-12): 2032-2041, (2011).
21. Roy, J.P., Mishra, M.K. and Misra,A., "Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic rankine cycle", *Energy* , 35 (12): 5049-5062, (2010).
22.  nal, S. A., "D şuk sıcaklıklı atık akışkan destekli g  üretim sistemlerinin optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 9- 15, (2011).
23. Chen H., Goswami D.Y. and Stefanakos E.K., "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 14: 3059–3067, (2010).
24. Eyidoğan, M., "Organik rankine çevrimli g  üretim sisteminin enerji ve ekserji analizi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2014).
25. Gang, P., Jing, L. and Jie, J., "Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative organic rankine cycle", *Applied Thermal Engineering*, 30: 998–1004, (2010).

26. Sanchez, D., Munoz De Escalona, J. M., Monje, B., Chacartegui, R. and Sanchez, T., "Preliminary analysis of compound systems based on high temperature fuel cell gas turbine and organic rankine cycle", *Journal Of Power Sources*, 196: 4355–4363, (2011).
27. Köse, R., "Research on the generation of electricity from the geothermal resources in simav region", *Renewable Energy*, 30 (1): 67-79, (2005).
28. Dağdaş, A., Öztürk, R. and Bekdemir, S., "Thermodynamic evaluation of denizli kızıldere geothermal power plant and its performance improvement", *Energy Conversion and Management*, 46 (2): 245-256, (2005).
29. Yılmaz, F., Selbaş, R. ve Balta, T., "Güneş enerjisi destekli organik rankine çevriminin ekserji analizi", *Makine Teknolojileri Elektrik Dergisi*, 12 (4): 39-50, (2015).
30. Pelit, M., "Biyokütle kaynaklı organik rankine çevrimli güç ünitesinin termoeconomik analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2015).
31. İnternet: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Önemi", <http://dergiler.ankara.edu.tr/dergiler/47.1155.13594.pdf> (2016).
32. İnternet: 3. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sistemleri Kış Okulu "Jeotermal Enerji Kaynakları", http://www.jeotermal.com/dokumanlar/dosyalar/yildiz_jeotermal_enerji_kaynaklari.pdf (2014).
33. Etemoğlu, B. A., İşman, M. K. ve Can, M., "Bursa ve çevresinde jeotermal enerjinin kullanılabilirliğinin incelenmesi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11 (1), (2006).
34. İnternet: Makine Mühendisleri Odası, "Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli", http://www.Mmo.Org.Tr/Resimler/Dosya_Ekler/A0819e9e2f84a52_Ek.Pdf (2016).
35. Işıksoluğu, M., Kurban, M. ve Dokur, E., "Jeotermal enerji santrallerinin Türkiye açısından değerlendirilmesi", *Eleco 2012 Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (2012).
36. Başaran, A., "Binary çevrimli jeotermal güç santrallerinde farklı soğutucu akışkan kullanımının performansa etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2012).
37. Yonar, G., "Jeotermal enerji ile ısıtılan Kütahya ili Simav ilçesindeki ısıtma sisteminin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve uygulanması gereken yenilikler", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-13, (2007).

38. Coşkun, A., “Türkiye’deki jeotermal kaynaklar için güç santrallerinin termodinamik analizi ve optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2011).
39. Yılmaz, M., “Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi”, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, Ankara, 4 (2): 33-54, (2012).
40. İnternet: Fırat Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi”, <http://www.ag-enerji.com/arsive/elazig.pdf> (2016)
41. İnternet: Jeotermal Enerji Semineri, “Jeotermal Kaynaklı Elektrik Üretimi”, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f058c634d01b96a_ek.pdf (2013).
42. Bilgiç, M., “Salavatlı (Aydın) jeotermal alanının hidrojeokimyasal ve jeotermal enerji potansiyelinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 14-17,(2015).
43. Halaçoğlu, U., “Kızıldere- II Jeotermal enerji santrali’nin performans analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).
44. Leibowitz, H. M. and Micak, H.A., “Design of a 2 Mw kalina cycle binary module for installation in husavik, iceland”, *Grc Transactions*, 23: 75-80, (1999).
45. Yılmaz, F., “Güneş çanaklı organik rankine çevriminin ısparta şartlarında incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2013).
46. Güneş, Ü., “Gemilerde atık ısı geri kazanım yöntemlerinin teknik ve ekonomik yönden incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2013).
47. Acar M., Koyun A. ve Koyun T., “Soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanlar ve bu akışkanların ozon tabakası üzerine etkileri”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 88: 46-53, (2005).
48. Batscha, D., “Türkiye’nin batısındaki jeotermal sahalar için jeotermal güç santrallerinin karşılaştırılması”, *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 61-62 (2011).
49. Agahı, R., Spadacını, C., Frassinetti, M. ve Xodo, L., “Organik rankin çevrimli jeotermal santrallerinde optimal hava soğutmalı yoğunlaştırıcı boyutlandırması”, *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, (2011).

50. Paul, D. ve Özden, H., “Organik rankine çevrim teknolojisiyle düşük sıcaklıktaki kaynaktan faydalanılarak elektrik üretimi. Örnek Çalışma: Sarayköy jeotermal santrali”, *Jeotermal Enerji Semineri X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Göknur KAYATAŞ 1990 yılında Kars'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kars Gazi Ahmet Muhtar Paşa İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Kars Alparslan Lisesinde tamamladı. 2009 yılında Adana Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğinde öğrenime başlayıp 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliğinde yüksek lisansa başladı. Aynı zamanda Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Çevre Mühendisliğini kazandı, hala okumaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: 100.Yıl Mahallesi 1065 Sokak Gündüz Yapı İnş.

Kat:1 Daire:2 100.Yıl/Karabük

Tel: (546) 907 44 64

E-posta: goknurezgi.kayatas@gmail.com