

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SINDIRGI-BALIKESİR JEOTERMAL BÖLGESEL
ISITMA SİSTEMİNİN
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Ali Osman BÜYÜKKÖSE

Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı

Alternatif Enerji Kaynakları Programı

HAZİRAN 2023

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Gönen Jeotermal Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Sındırgı-Balıkesir Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim./...../20...

Ali Osman BÜYÜKKÖSE

İmza

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SINDIRGI-BALIKESİR JEOTERMAL BÖLGESEL
ISITMA SİSTEMİNİN
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Ali Osman BÜYÜKKÖSE

DANIŞMAN
Doç. Dr. Asiye ASLAN

Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı

Alternatif Enerji Kaynakları Programı

HAZİRAN 2023

ÖNSÖZ

Sanayi alanında teknolojik gelişmeler ve aynı zamanda dünya nüfusundaki artış enerjiye olan talebi giderek arttırmaktadır. Bununla birlikte enerji üretimi, dönüşümü, tüketimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan atıklar ekosistemi etkileyen çevresel sorunlara yol açmaktadır. Ekosistemi bozan en önemli etki sera gazı salınımıdır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde rüzgar, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları oldukça önem kazanmıştır.

Jeotermal enerji temiz, doğa dostu ve diğer kaynaklarla karşılaştırıldığında ucuz bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi eldesi, konut ısıtma, sera ısıtma, sebze meyve kurutulması ve endüstrinin çeşitli alanlarında faydalanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak sistem performansının iyileştirilmesine yönelik çeşitli öneriler sunulmuş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımının ülkemiz ve dünyanın geleceği için önemi vurgulanmıştır.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Asiye ASLAN'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana destek olan aileme, varlıkları ile birer motivasyon kaynağı olan kızım Ayten'e, yeğenlerim Efe, Deniz ve Pelin'e teşekkür ederim.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SINDIRGI-BALIKESİR JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Ali Osman BÜYÜKKÖSE

**Bandırma Onyedİ Eylöl Üniversitesi
Gönen Jeotermal Enstitüsü
Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Asiye ASLAN

Haziran 2023, 77 sayfa

Jeotermal enerji önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Balıkesir ili jeotermal kaynaklar açısından Türkiye’de önde gelen illerdendir. Günümüz itibariyle il genelinde beş adet bölgesel ısıtma sistemi bulunmakla beraber Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma sistemi bunlardan birisidir. Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma sistemi ile 4650 konut eşdeğeri ısıtma gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin kış ve bahar dönemleri ayrı ayrı ele alınarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Analizlerde, ölçüm yapılarak veya sistem üzerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

Analiz sonuçları enerji ve ekserji verimleri, enerji ve ekserji kayıpları açısından incelenmiş, elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler kullanılarak yorumlanmıştır. Sistem performansının ve verimliliğın arttırılmasına yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Jeotermal Enerji, Bölgesel Isıtma Sistemi, Enerji-Ekserji Analizi.

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF SINDIRGI-BALIKESIR GEOTHERMAL DISTRICT HEATING SYSTEM

Ali Osman BÜYÜKKÖSE

**Bandırma Onyedi Eylül University
Gönen Geothermal Institute
Department of Alternative Energy Sources**

Supervisor: Assoc. Prof. Asiye ASLAN

June 2023, 77 pages

Geothermal energy is an important renewable energy source. Balıkesir province is one of the leading provinces in Turkey in terms of geothermal resources. As of today, there are five district heating systems throughout the province, and Sındırgı Geothermal District Heating system is one of them. With the Sındırgı Geothermal District Heating system, the equivalent of 4650 residences is heated.

In this thesis study, the energy and exergy analysis of the Sındırgı Geothermal District Heating System was carried out by considering the winter and spring periods separately. In the analysis, the data obtained by measuring or from the system were used.

Analysis results were examined in terms of energy and exergy efficiencies, energy and exergy losses, and the results were interpreted using tables and graphics. Suggestions for increasing system performance and efficiency were presented.

Keywords: Renewable Energy Resources, Geothermal Energy, District Heating System, Energy-Exergy Analysis.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ.....	VII
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	5
1.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
1.2.1 Jeotermal Enerji	6
1.2.2 Dünyada Ve Türkiye'de Jeotermal Enerji Kapasiteleri	10
1.3 BALIKESİR İLİ JEOTERMAL KAYNAKLAR.....	23
1.4 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	28
1.5 JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMLERİ.....	34
1.5.1 Isı Değiştiriciler	35
1.5.2 Jeotermal Boru Dağıtım Hatları	37
1.5.3 Jeotermal Akışkanın Pompajı.....	38
1.5.4 Jeotermal Akışkanın Çevreye Etkisi	39
1.5.4.1 Hava Kirliliği	39
1.5.4.2 Su Kirliliği.....	39
1.5.4.3 Toprak Çökmesi	39
1.5.4.4 Depremsellik	40
1.5.4.5 Ses	40
1.5.4.6 Korozyon.....	40

1.6 JEOTERMAL ENERJİNİN ENTEGRE KULLANIMI	41
1.7 ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ.....	42
1.7.1 Termodinamik Bağlantılar	44
2. MATERYAL VE YÖNTEM	48
2.1 SINDIRGI İLÇESİNİN TANITIMI	48
2.2 SINDIRGI JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ	48
2.1.1 Jeotermal Saha ve Kuyular	48
2.1.2 Isı Merkezi.....	50
2.1.3 Boru Hatları.....	52
2.1.4 Jeotermal Enerjinin Diğer Kullanım Yerleri.....	53
2.3 ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YAPILAN ÖLÇÜMLER.....	56
2.3.1 Debi Ölçüm Çalışmaları.....	57
2.4 SINDIRGI JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ	58
2.4.1 Kütle Dengesi, Enerji ve Ekserji Analizi Bağlantıları	58
2.4.2 Ekserji Kayıpları	60
2.4.3 Enerji ve Ekserji Verimliliği.....	60
2.4.4 Jeotermal Kaynakların Ekserji Analizine Göre Sınıflandırılması	61
3. BULGULAR.....	62
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	71
5. KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1-1: Dünyada yenilenebilir kaynaklardan elde edilen birincil enerjinin payı,2021.....	2
Şekil 1-2: Dünyada yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin payı,2021	3
Şekil 1-3: Yenilenebilir enerji üretimi,2021	3
Şekil 1-4: Türkiye'de üretim teknolojilerine göre kurulu güç dağılımları	4
Şekil 1-5: Jeotermal enerjinin oluşumu.....	6
Şekil 1-6: Dünyada ve Avrupa'da jeotermal enerji kurulu kapasite, 2020.....	11
Şekil 1-7: 2010'dan 2025'e dünyada toplam kapasite	13
Şekil 1-8: 2010' dan 2025'e toplam kapasitedeki yüzde değişim	13
Şekil 1-9: 2015' ten sonra eklenen kapasite	14
Şekil 1-10: Dünya üzerindeki jeotermal santraller	14
Şekil 1-11: Küresel doğrudan kullanım kurulu kapasite ve büyüme oranları	16
Şekil 1-12: Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası	20
Şekil 1-13: Türkiye'de her yıl eklenen Jeotermal güç kapasiteleri.....	21
Şekil 1-14: Türkiye'de santral tipine göre her yıl eklenen ünite sayısı	21
Şekil 1-15: Türkiye'de santral tipine göre her yıl eklenen kapasite	22
Şekil 1-16: Balıkesir ili jeotermal kaynakları haritası	23
Şekil 1-17: Jeotermal bölgesel ısıtma türleri.....	35
Şekil 1-18: Plakalı ısı değiştirici	36
Şekil 1-19: Plakalı ısı değiştirici parçaları.....	36
Şekil 1-20: Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde kullanılan ön izolasyonlu boru tipi.....	37
Şekil 1-21: Borulama sistemleri.....	37
Şekil 1-22: Dik milli derin kuyu pompası görünümü.....	38
Şekil 1-23: Jeotermal entegre sistem uygulaması	41
Şekil 2-1: Sındırgı jeotermal bölgesinin harita üzerinde gösterilmesi.....	49
Şekil 2-2: Jeotermal ısı merkezi akış şeması	51
Şekil 2-3: Jeotermal ısı merkezinden görünüm	52
Şekil 2-4: Doğal çıkışlı kaynak görünümü	53
Şekil 2-5: Balık çiftliğinden görünüm	54
Şekil 2-6: Pansiyon ve seralardan görünüm	54
Şekil 2-7: Jeotermal enerji ile sebze meyve kurutma	55

Şekil 2-8: Debi ölçümü görünümü	57
Şekil 3-1: Kış ve Bahar döneminde enerji ve ekserji verimleri.....	66
Şekil 3-2: Kış ve Bahar döneminde ortaya çıkan enerji kayıpları	67
Şekil 3-3: Kış ve Bahar döneminde ortaya çıkan ekserji kayıpları	67
Şekil 3-4: Sındırgı JBIS Kış dönemi enerji akış diyagramı	68
Şekil 3-5: Sındırgı JBIS Bahar dönemi enerji akış diyagramı.....	68
Şekil 3-6: Sındırgı JBIS Kış dönemi ekserji akış diyagramı.....	69
Şekil 3-7: Sındırgı JBIS Bahar dönemi ekserji akış diyagramı	69
Şekil 3-8: Kış döneminde eşanjör iyileştirme potansiyeli	70
Şekil 3-9: Bahar döneminde eşanjör iyileştirme potansiyeli	70



TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1-1: Jeotermal enerjinin kullanım alanları	9
Tablo 1-2: Küresel elektrik üretim kapasitesi ve büyüme oranları.....	12
Tablo 1-3: 2015'ten 2020'ye kadar jeotermal enerji ve enerji üretim istatistikleri.....	15
Tablo 1-4: Dünya genelinde bölge ve kıtaya göre doğrudan kullanım verilerinin özeti.....	17
Tablo 1-5: 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 ve 2020 verileri ile kapasite değerleri.....	18
Tablo 1-6: 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 ve 2020 verileri ile enerji kullanım değerleri.....	19
Tablo 1-7: Balıkesir ili hesaplanan toplam muhtemel potansiyel	24
Tablo 1-8: Balıkesir jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri	27
Tablo 1-9: Enerji ve ekserji karşılaştırılması.....	43
Tablo 2-1: Jeotermal kuyuların teknik özellikleri.....	50
Tablo 2-2: Isı değıştircilerin özellikleri	50
Tablo 2-3: Isı merkezindeki pompaların teknik özellikleri	52
Tablo 2-4: Ölçümlerde kullanılan cihazların teknik özellikleri ve kullanım yerleri	56
Tablo 3-1: Enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı durum ve özellikleri	62
Tablo 3-2: Enerji- ekserji oranları (Kış dönemi).....	63
Tablo 3-3: Enerji- ekserji oranları (Bahar dönemi).....	64
Tablo 3-4: Kış ve bahar dönemleri için enerji analizi sonuçları	65
Tablo 3-5: Kış ve bahar dönemleri için ekserji analizi sonuçları	65
Tablo 3-6: Yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri	66

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\dot{E}$	: Enerji oranı, kW
$\dot{E}_x$	: Ekserji oranı, kW
h	: Entalpi, kJ/kg
$\dot{m}$	: Kütleli debi, kg/s
P	: Basınç, kPa, bar
s	: Entropi, kJ/kg
SE_{ExI}	: Özgöl ekserji indeksi
T	: Sıcaklık, °C, K
$\dot{Q}$	: Isı giriş akımı, kW
$\dot{W}$	: İş akımı, kW
η	: Enerji verimliliğı
ε	: Ekserji verimliliğı
ψ	: Ekserji akışı, kJ/kg

Kısaltmalar	Açıklama
JBIS	: Jeotermal bölgesel ısıtma sistemi
KE	: Konut eşdeğeri
ÖH	: Ölü hal
S	: Su
TS	: Termal su

1. GİRİŞ

Enerji ülkelerin gelişmesinde, yaşam standartlarının artmasında ve toplumun refah düzeyinin yükselmesinde en önemli faktörlerden birisidir. Enerji ısı, mekanik, elektrik ve nükleer gibi farklı biçimlerde bulunmakta olup, bir biçimden diğerine dönüşebilmekte ve farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Sanayi alanında teknolojik gelişmeler ve aynı zamanda dünya nüfustaki artış enerjiye olan talebi giderek arttırmaktadır. Bununla birlikte enerji üretimi, dönüşümü, tüketimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan atıklar ekosistemi etkileyen çevresel sorunlara yol açmaktadır. En önemli etki sera gazı salınımıdır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları (jeotermal, rüzgar, güneş vb.) oldukça önem kazanmıştır [1-3].

Yenilenebilir enerji kaynakları ekonomik büyüme, istihdam ve yoksulluğun azaltılmasını desteklerken, ülkelerin ekonomilerinin çeşitlendirilmesine ve bununla birlikte fosil yakıtların öngörülemeyen fiyat dalgalanmalarından korunmasına izin vererek ithalat bağımlılığından kurtulmanın bir yolunu da sunmaktadır [4].

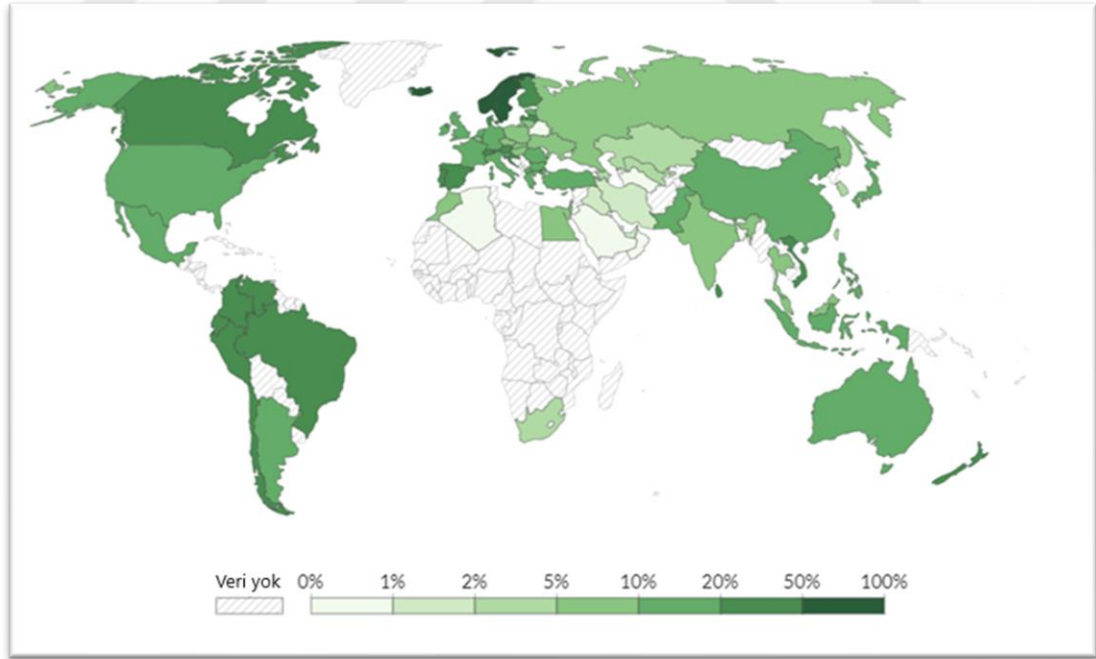
Yenilenebilir enerji sektörü günümüzde dünyanın birçok yerinde en ucuz enerji seçeneğidir. Yenilenebilir enerji ile ilgili teknolojilerin fiyatları hızla düşmektedir. Güneş enerjisinden elektrik üretme maliyeti 2010 ile 2020 yılları arasında %85 oranında, kara ve deniz rüzgar enerjisi maliyetleri ise sırasıyla %56 ve %48 oranında düşmüştür. Düşen fiyatlar, yenilenebilir enerjiyi her yerde daha cazip hale getirmektedir. Düşen maliyetlerle birlikte, önümüzdeki yıllarda yeni güç kaynağının önemli bir çoğunluğunun düşük karbonlu kaynaklardan sağlanması için gerçek bir fırsat oluşmaktadır [4].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, dünyada yaşayan insanların yaklaşık yüzde 99'u hava kalitesi sınırlarını aşan ve sağlıklarını her türlü tehdit eden havayı solumaktadır. Dünya çapında her yıl 13 milyondan fazla ölüm, önlenemez çevresel faktörlerden kaynaklanmaktadır. Sağlıksız ince partikül madde ve nitrojen dioksit seviyeleri, temel olarak fosil yakıtların yakılması nedeniyle meydana gelmektedir. 2018'de fosil yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliği, günde yaklaşık 8 milyar dolar olmak üzere 2.9 trilyon dolarlık sağlık ve ekonomik maliyete neden olmuştur. Rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarına geçiş yalnızca iklim değişikliğinin değil, aynı zamanda hava kirliliği ve sağlığın da ele alınmasına yardımcı olmaktadır [4].

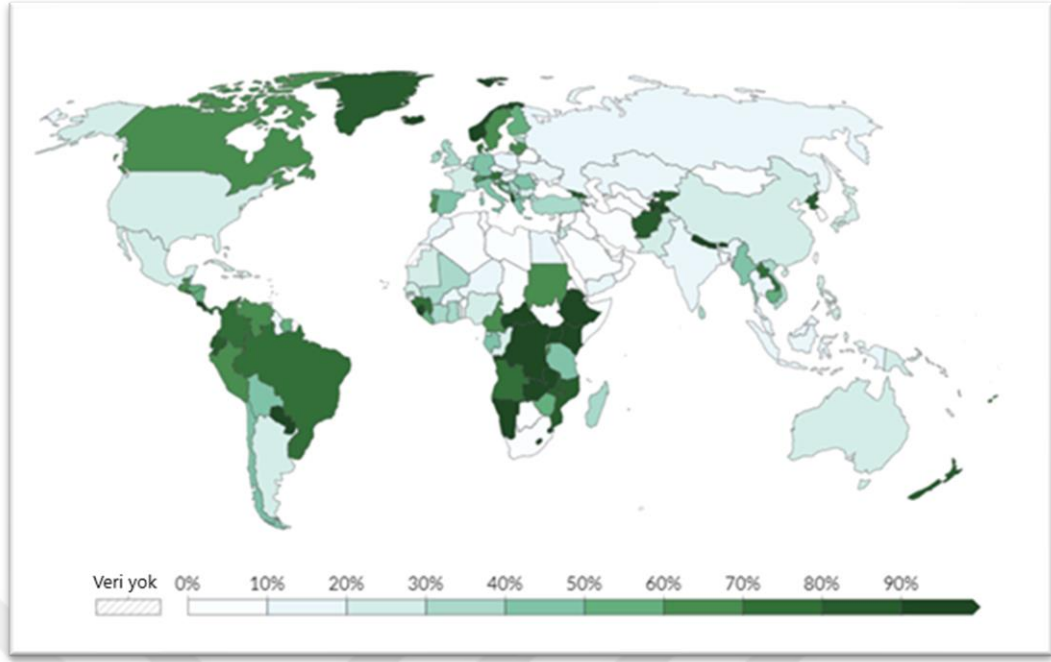
Yenilenebilir enerjiye yapılan her bir dolarlık yatırım, fosil yakıt endüstrisinden üç kat daha fazla istihdam yaratmaktadır. IEA, net sıfır emisyona geçişin enerji sektöründeki işlerde genel bir artışa yol açacağını tahmin etmekte: 2030 yılına kadar fosil yakıt üretiminde yaklaşık 5 milyon iş

kaybedilebilirken, temiz enerjide tahmini 14 milyon yeni iş yaratılacak, 9 milyon iş net kazanç ile sonuçlanacaktır. Buna ek olarak, enerji ile ilgili endüstriler, örneğin elektrikli araçların ve hiper verimli cihazların imalatında veya hidrojen gibi yenilikçi teknolojilerde yeni roller üstlenmek için 16 milyon işçiye daha ihtiyaç duyacaktır. Bu, 2030 yılına kadar temiz enerji, verimlilik ve düşük emisyon teknolojilerinde toplam 30 milyondan fazla işin yaratılabileceği anlamına gelmektedir [4].

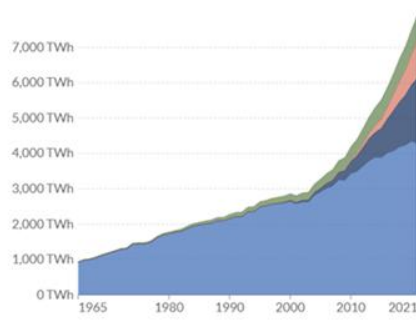
Şekil 1-1 dünyada hidroelektrik, güneş, rüzgar, jeotermal, dalga, gelgit ve modern biyoyakıtların kombinasyonu (geleneksel biyokütle) gibi yenilenebilir teknolojilerden gelen birincil enerji tüketiminin payını göstermektedir. 2019'da, küresel birincil enerjinin yaklaşık %11'i yenilenebilir teknolojilerden gelmiştir. Enerji tüketimi elektrik, ulaşım ve ısıtmanın toplamını temsil etmektedir. Şekil 1-2 yenilenebilir teknolojilerden elde edilen elektriğin payını göstermektedir. Küresel olarak, elektriğimizin yaklaşık dörtte biri yenilenebilir kaynaklardan gelmektedir. Şekil 1-3 2021 yılına ait Dünya'da, Avrupa'da ve Türkiye'de enerji üretim grafiklerini vermektedir. Grafikte hidroelektrik, rüzgar, güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları verilmiştir. Hidroelektrik enerji en yüksek orana sahiptir.



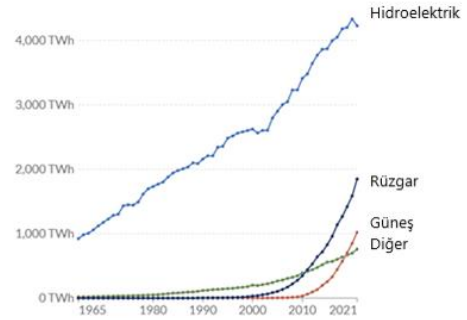
Şekil 1-1: Dünyada yenilenebilir kaynaklardan elde edilen birincil enerjinin payı, 2021 [5]



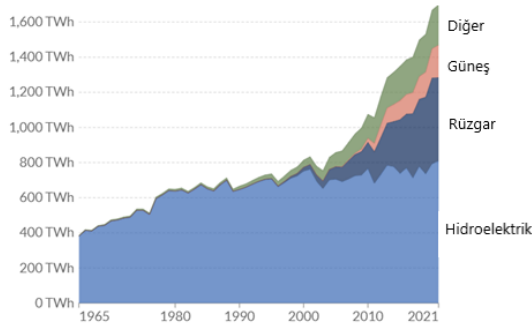
Şekil 1-2: Dünyada yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin payı, 2021 [5]



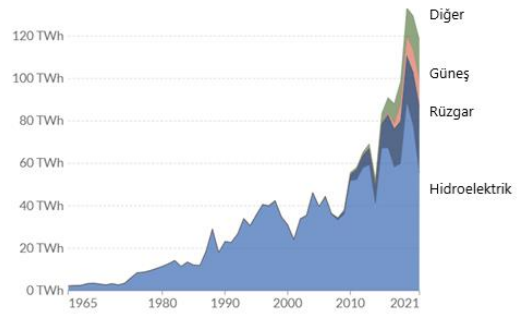
Dünyada yenilenebilir enerji üretimi



Dünyada modern yenilenebilir enerji üretimi



Avrupa'da yenilenebilir enerji üretimi



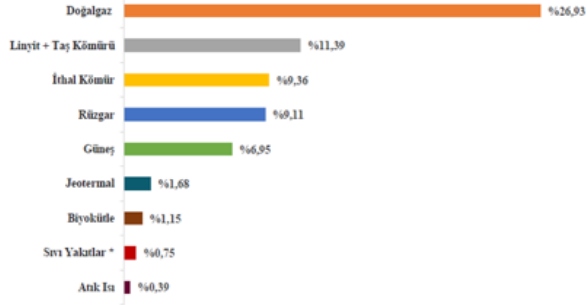
Türkiye'de yenilenebilir enerji üretimi

Şekil 1-3: Yenilenebilir enerji üretimi, 2021 [5]

Türkiye’de 2022 yılında 325,888 GWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1-4’te 2020, 2021 ve 2022 yılları için üretim teknolojilerinin kapasite miktarları verilmiştir. Jeotermal enerji 2020 yılında %1.68 iken 2022 yılında %1.69 oranına çıkmıştır. Güneş ve rüzgar enerjisindeki yüksek artış oranları dikkat çekmektedir.

KAYNAKLAR	MW
Hidrolik	30.983
Doğal Gaz	25.846
Linyit + Taş Kömürü	10.931
İthal Kömür	8.987
Rüzgar	8.740
Güneş	6.671
Jeotermal	1.613
Biyokütle	1.107
Sıvı Yakıtlar*+Asfaltit	716
Atık Isı	370
TOPLAM	95.964

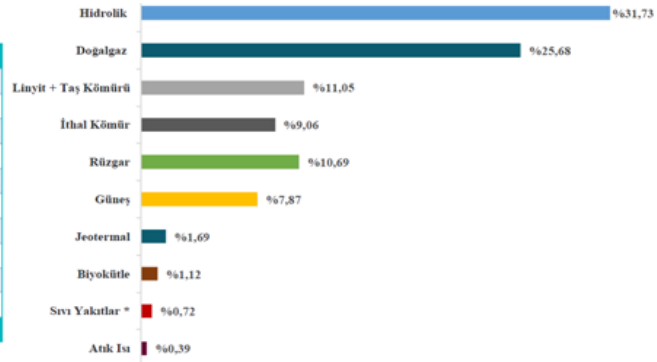
* Sıvı Yakıtlar (Fuel Oil+Motorin+ Nafta)



2020 yılı kurulu güç dağılımı

KAYNAKLAR	MW
Hidrolik	31.490
Doğal Gaz	25.481
Linyit + Taş Kömürü	10.961
İthal Kömür	8.994
Rüzgar	10.607
Güneş	7.813
Jeotermal	1.676
Biyokütle	1.638
Sıvı Yakıtlar*+Asfaltit	662
Atık Isı	391
TOPLAM	99.713

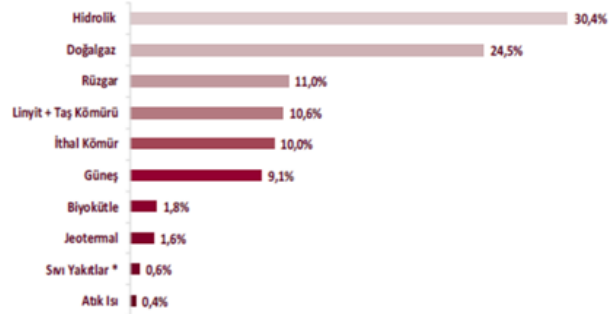
* Sıvı Yakıtlar (Fuel Oil+Motorin+ Nafta)



2021 yılı kurulu güç dağılımı

KAYNAKLAR	MW
Hidrolik	31.586
Doğalgaz	25.519
Rüzgar	11.396
Linyit + Taş Kömürü	11.032
İthal Kömür	10.374
Güneş	9.486
Biyokütle	1.922
Jeotermal	1.691
Sıvı Yakıtlar *	662
Atık Isı	387
TOPLAM	104.055

(*) : Sıvı Yakıtlar (Fuel Oil+Motorin+ Nafta+Asfaltit)



2022 yılı kurulu güç dağılımı

Şekil 1-4: Türkiye’de üretim teknolojilerine göre kurulu güç dağılımları [6]

1.1 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Enerji ve ekserji analizi, enerji sistemleri incelenmesinde oldukça önemlidir. Enerji analizi termodinamiğin birinci yasasıyla ilgili olup, ekserji analizi ise termodinamiğin ikinci yasasıyla ilgilidir.

Jeotermal enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Tez çalışmasının yapıldığı Balıkesir Sındırgı İlçesi açısından hem de ülkemiz açısından önemli avantajlar getirmektedir. Bu yüksek lisans tezinin amacı, Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde üretilen jeotermal enerjinin daha verimli kullanılabilmesi ve sistemde yaşanan çeşitli problemlere çözüm bulunabilmesi için sistemin enerji ve ekserji analizinin yapılarak sistem veriminin araştırılmasıdır.

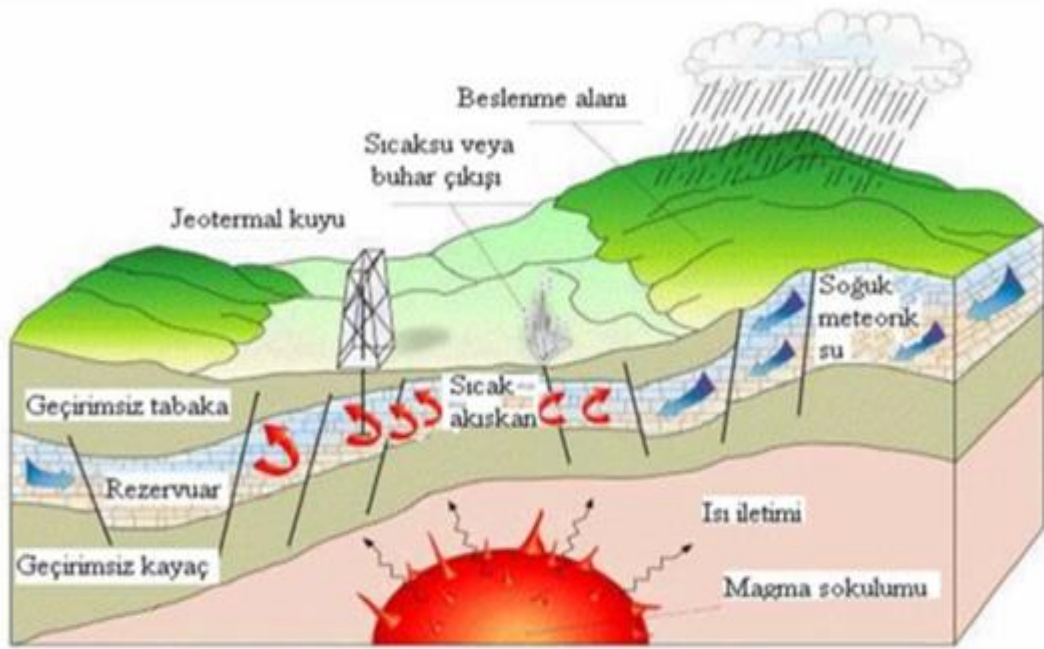
Tezin giriş bölümünde amaç ve kapsam açıklanarak literatür taramasına yer verilmiştir. Literatür kısmında jeotermal enerjinin oluşumu ve Dünyada ve Türkiye’de jeotermal potansiyel ve kapasiteleri araştırılmıştır. Sındırgı ilçesi Balıkesir ilinde bulunmakta olup Balıkesir ili jeotermal kaynak bakımından zengin illerimizdendir. Bu kapsamda Balıkesir ili jeotermal kaynaklar ile ilgili bilgilere bu bölümde yer verilmiştir. Daha sonra bölgesel ısıtma sistemleri ve çeşitlerine ilişkin bilgilendirme yapılmış ve enerji ve ekserji analizine ilişkin termodinamik bağıntılar verilmiştir. Materyal ve metot bölümünde Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma hakkında detaylı bilgi sunularak enerji analizi ve ekserji analizi metodolojisi verilmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümünde sistemden alınan veriler veya ölçüm yapılarak elde edilen veriler kullanılarak bölgesel ısıtma için, enerji ve ekserji analizi hesaplamaları yapılmış ve elde edilen bulgular sunularak tartışılmıştır. Sonuç ve Öneriler bölümünde elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve enerji verimliliğinin artırılması ile enerji tasarrufu açısından önerilerde bulunulmuştur. Kaynaklar bölümünde tez çalışmasında yararlanılan kaynaklar sunulmuştur.

1.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.2.1 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji kısaca yer ısısı olarak tanımlanmaktadır. Daha geniş bir ifadeyle yer yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısınin oluşturduğu ve potansiyelini yeryüzündeki havzalardan beslenen sularla oluşturan, sıcaklıkları bölgesel olarak değişen ve bünyesinde kimyasallar ve erimiş mineraller içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Bununla birlikte sıcak kuru kayalar olarak ifade edilen bazı sert kayaların oluşturduğu sistemlerde bünyesinde su bulunmamasına rağmen, bazı teknik yöntemler kullanılarak ısılarından faydalanılabildiği için yine bu bölgelerde depolanan enerji jeotermal enerjiyi oluşturmaktadır [7, 8]. Şekil 1-5 jeotermal enerji oluşumu döngüsünü vermektedir.

Yer yüzeyinden yağmur, kar suyu gibi meteorik sular yeraltına kırık ve çatlak sistemleri ile süzülerek yeraltında bulunan rezervuarlarda birikirler. Bu sular ısı kaynağı ile ısıtılırlar ve mineral ve kimyasal içeriği bakımından zenginleşir. Daha sonra yine kırık ve çatlak sistemleri ile tekrar yeryüzüne geri ulaşırlar. Bu şekilde jeotermal enerji sıcak su kaynakları oluşur [7, 8].



Şekil 1-5: Jeotermal enerjinin oluşumu

Jeotermal enerji yenilenebilir, temiz, doğa dostu bir enerji kaynağıdır. Yeraltından ısının yeryüzüne taşınması ısı iletimi yolu ile gerçekleşmektedir. Bu iki farklı şekilde mümkün olabilir.

1. Eriyik halde bulunan magmanın üst bölgelere sokulması
2. Sıcak katmanların kabuk kalınlıklarının az olduğu bölgelerde yukarıya doğru ısıyı iletmesi

Bu olaylar neticesinde ısınmış bölgelerdeki yeraltı suları termal kaynaklar şeklinde sıcak su, buhar veya su buhar karışımı çıkışları şeklinde yüzeyde meydana gelir.

Jeotermal kaynakların kullanımına ilişkin tarihçeye bakıldığında M.Ö. 10,000’li yıllarda Akdeniz bölgesinde çanak, çömlek ve cam yapımında jeotermal enerjiden yararlanıldığı M.Ö 1500’lü yıllarda ise Romalı ve Çinliler tarafından banyo, ısınma ve pişirme amaçlı kullanıldığı görülmektedir. Jeotermal enerji 1800’lü yılların başına kadar mekan ve su ısıtması amacıyla kullanılmış, 1818 yılında Fransa’da jeotermal buhar kullanılarak borik asit elde edilmiştir. Jeotermal buhardan ilk elektrik üretimi 1904 yılında İtalya’da gerçekleştirilmiştir. Türkiye’de jeotermal enerjinin kullanımıyla ilgili tarihsel bilgiler kronolojik olarak şöyle sıralanabilir [9].

- 1962: MTA tarafından jeotermal kaynak arama çalışmaları başlatıldı.
- 1963: Türkiye’de İzmir Balçova’da ilk jeotermal sondaj kuyusu açıldı.
- 1964: İlk jeotermal ısıtma uygulama çalışmaları Gönen Balıkesir’de başlatıldı.
- 1968: Elektrik üretim amacıyla ilk jeotermal kuyunun inşaatına Denizli Kızıldere’de başlanmıştır.
- 1982: Germencik-Aydın jeotermal sahası keşfedildi.
- 1984: Türkiye’nin birinci Avrupa’nın ise ikinci jeotermal elektrik enerji santrali 20.4 MWe kapasite ile Kızıldere-Denizli’de üretime alındı.
- 1987: Türkiye’de ilk jeotermal bölgesel ısıtma sistemi olan Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sistemi Gönen-Balıkesir’de devreye alınarak işletmeye açıldı.
- 1996: 15,000 konut kapasiteyle Balçova-İzmir jeotermal bölgesel ısıtma sistemi devreye girdi.
- 2006: 7.95 MWe kapasiteli ilk özel sektör jeotermal elektrik enerji santrali DORA-1 devreye alındı.
- 2007: Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu (5686 sayılı) yürürlüğe girdi.
- 2021: Türkiye genelinde jeotermal enerji santrali kurulu gücü 1613 MW değerine ulaştı.

Jeotermal enerjinin diğ er enerji türlerine üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz [10]:

- Jeotermal enerji tükenmeyen devamlı yenilenen enerji kaynaklarındandır.
- Tükenebilir özellikte olan kömür, petrol, doğalgaz fosil yakıtlara ve nükleer enerji gibi diğ er kaynaklarına göre uzun ömürlüdür.
- Diğ er enerji türleri ile karşılaştırıldığında jeotermal enerjinin maliyeti oldukça ucuzdur.
- Fosil enerji kaynakları ve nükleer kaynaklı enerji üretimleri ile karşılaştırıldığında yok sayılacak kadar düşük bir oranda çevreye negatif etkisi olmaktadır (Örneğin, kömür santrallerinde CO₂ emisyonları, eski tip jeotermal santrallerdekine göre 1600 kat daha fazladır).
- Jeotermal kaynaklar tedavi amaçlı olarak ta kullanılabil diğ i için mineral yapısı ile bazı hastalıkların iyileştirilmesinde fayda sağlarlar.
- Elektrik üretimi dışındaki uygulamalar değ erlendirildiğ inde ulusal teknolojiler geliştirilebilir.
- Jeotermal saha araştırmaları, sondaj çalışmaları, üretimin başlaması ve tesislerin aktif hale getirilmesi için geçen süre, diğ er kaynaklara göre daha kısadır.
- Jeotermal akışkan içerisinde bulunan kimyasal maddeler, bir takım tekniklerle jeotermal akışkandan ayrılarak ekonomik fayda sağlanabilmektedir. Bu uygulama ile borik asit, amonyum bikarbonat, ağır su (D₂O), amonyum sülfat, kuru buz (CO₂ buzu) gibi endüstriyel tesislerde farklı amaçlar için kullanılan maddeler elde edilmektedir.

Jeotermal enerjinin dezavantajlarını ise şu şekilde sıralayabiliriz [11]:

- Jeotermal enerji ile ilgili bir dezavantaj, jeotermal enerjinin konuma bağı lı olmasıdır. Kurulan santraller jeotermal enerjinin mevcut bulunduğu bölgelere inşa edilmesi gerekmektedir.
- Jeotermal enerji her ne kadar sera gazları salmasa da, kazı sırasında atmosfere salınan bazı zararlı gazları da içermektedir. İnsan sağ lığı na zararlı olabilecek düşük konsantrasyonlarda hidrojen sülfürün atmosfere serbest bırakılması söz konusu olabilmektedir. Aynı zamanda yine az miktarda karbon dioksit, metan, amonyak ve bor gibi salınımlar meydana gelmektedir.
- Jeotermal enerjinin bir baş ka dezavantajı deprem oluş ma riski yaratmasıdır.
- Jeotermal enerji sistemlerinde sürdürülebilirliğ in sağ lanması için jeotermal akışkanın yeraltına tekrar geri basılması gerekmektedir. Bu, jeotermal sistemlerin sürdürülebilirliğ ini korumak için önemlidir.

Jeotermal enerjinin sıcaklık değerine göre kullanım alanları çeşitlenmektedir. Yüksek sıcaklıklı kaynaklardan elektrik üretimi gerçekleştirilmekte olup, orta ve düşük sıcaklıklı kaynaklardan ise konut ısıtma, sera ısıtması, endüstriyel faaliyetler ve diğer doğrudan uygulamalarda yararlanılmaktadır. Tablo 1-1’de jeotermal kaynakların sıcaklık değerine göre kullanım alanları verilmiştir [12].

Tablo 1-1: Jeotermal enerjinin kullanım alanları

Sıcaklık (° C)	Kullanım Alanları
180	Yüksek konsantrasyonlu solüsyonların buharlaştırılması, elektrik eldesi, amonyum absorpsiyon ile soğutma uygulaması
170	Diyatomitlerin kurutulması, ağır su ve hidrojen sülfid eldesi
160	Kereste ve balık kurutmacılığın da kullanım
150	Alüminyum eldesi
140	Konservecilikte kullanım, çiftlik ürünlerinin kurutulması
130	Şeker ve tuz endüstrisinde kullanım
120	Distilasyonla su elde edilmesinde kullanım
110	Çimento kurutmada kullanım
100	Organik maddelerin kurutulmasında (deniz yosunu, çimen, sebze) ve yün yıkama
90	Balıkların kurutulmasında (stok balık)
80	Sera ısıtması ve yer ısıtmasında kullanım
70	Soğutmada kullanım (alt sıcaklık limiti)
60	Ahır ısıtmacılığı ve kümes ısıtmacılığı
50	Mantar yetiştiriciliği, balneolojik uygulamalar
40	Toprak ısıtma, yüzme havuzları
20	Balık çiftlikleri

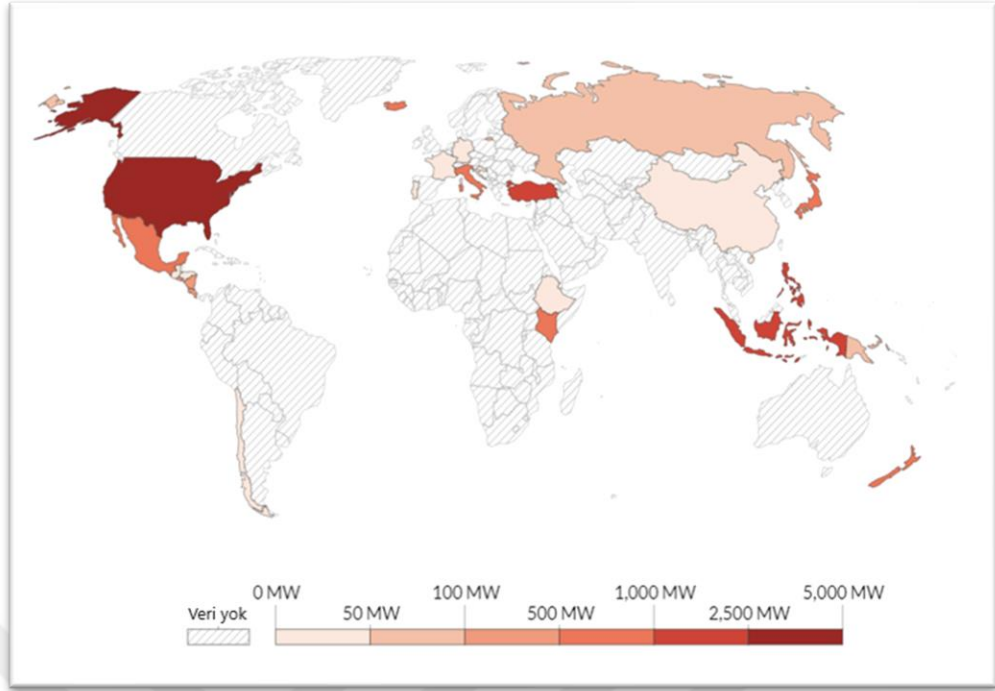
1.2.2 Dünyada ve Türkiye’de Jeotermal Enerji Kapasiteleri

Jeotermal enerji elektrik eldesi, ısıtma, soğutma uygulamaları ve hidrojen üretimi gibi hedefler için kullanılabilen yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olarak bilinmektedir. Jeotermal akışkandan enerji üretilmesi ve bunun yanında ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılabilmesi için jeotermal kaynak sıcaklığı önemlidir. Jeotermal enerjiyi tek bir kaynaktan entegre kullanım şeklinde birden fazla uygulamada değerlendirmek, hem sistem verimini arttırmakta hem de sistemin maliyetini daha uygun hale getirmektedir [13].

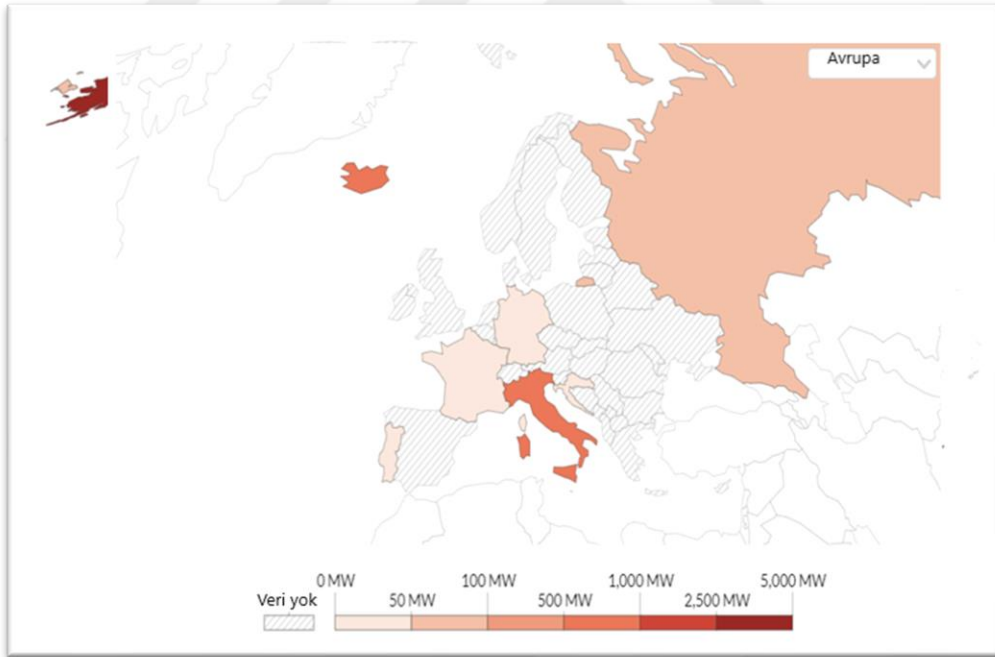
Jeotermal enerjinin kullanıldığı farklı teknolojiler vardır. Bölgesel ısıtma sistemleri, ısı pompası sistemleri, sera ısıtmacılığı gibi kullanımlar jeotermal enerjinin direkt olarak kullanıldığı uygulamalardır. Şekil 1-6’da 2020 yılına ait Dünya’da ve Avrupa’da jeotermal enerji kurulu kapasiteleri bölgeler olarak gösterilmektedir [5].

Jeotermal enerji kaynaklarından yüksek entalpiye sahip rezervuarlardan elektrik üretme teknolojisi 1913’ten itibaren gerçekleştirilmektedir. Bugün faaliyet gösteren enerji santrallerinin önemli bir kısmı, kuru buhar santralleri ya da düşük sıcaklıkları kullanan (tekli, çift ve üçlü) flaş buhar santralleridir. Bu teknolojiler ile birlikte günümüzde, jeotermal akışkanın ısı eşanjörleri kullanılarak kapalı bir çevrimde bir proses akışkanını ısıtmak için kullanıldığı ikili çevrim (Binary) teknolojisinin gelişimiyle, orta sıcaklıklı jeotermal sahaların elektrik üretmek ya da birleşik ısı ve güç elde etmek için giderek daha fazla kullanılması mümkün olmaktadır [14].

Jeotermal enerji ile küresel elektrik üretim kapasitesi 2020 yılı sonu itibariyle 15,608 MW olarak gerçekleşmiştir. Tablo 1-2’de 2005-2020 yılları arası jeotermal enerji kapasite ve büyüme oranları verilmiştir. Mevcut pandemi durumunun bildirilen sınırlı büyüme ile açıkça gelişmeyi yavaşlattığı görülmektedir. Jeotermal enerji ile elektrik üretimi, 2020 yılında yıllık bazda tahmini olarak %2 oranında artmış ve önceki beş yıl ortalama büyümesinin altına düşmüştür. 2020 yılında eklenen ve hemen hemen tüm jeotermal üretim kapasitesini temsil eden en büyük büyüme, 168 MW ilave kapasiteyle Türkiye’de gerçekleşmiştir. Buradaki tüm kapasite ikili çevrim teknolojisini temsil etmektedir [15-17].



(a) Dünyada jeotermal enerji kurulu kapasite, 2020



(b) Avrupa'da jeotermal enerji kurulu kapasite, 2020

Şekil 1-6: Dünyada ve Avrupa'da jeotermal enerji kurulu kapasite, 2020 [5]

Tablo 1-2: Küresel elektrik üretim kapasitesi ve büyüme oranları

	Global Kapasite	Kapasitede Büyüme	Yüzde Büyüme
Yıl	(MWe)	(MWe)	(%)
2005	8686	—	—
2006	8918	232	2.67
2007	9139	221	2.48
2008	9459	320	3.50
2009	9899	440	4.65
2010	10121	222	2.24
2011	10011	-110	-1.09
2012	10471	460	4.59
2013	10740	269	2.57
2014	11221	481	4.48
2015	11846	625	5.57
2016	12706	860	7.26
2017	13280	574	4.52
2018	14600	1320	9.94
2019	15400	800	5.48
2020	15608	208	1.35
Toplam/Ort		461.60/Yıl	% 4.01

2020 yıl sonu itibariyle en iyi 10 jeotermal ülke sıralaması aşağıda verilmiştir: [16].

Amerika Birleşik Devletleri (3,714 MW)

Endonezya (2,133 MW)

Filipinler (1,918 MW)

Türkiye (1,526 MW)

Yeni Zelanda (1,005 MW)

Meksika (962,7 MW)

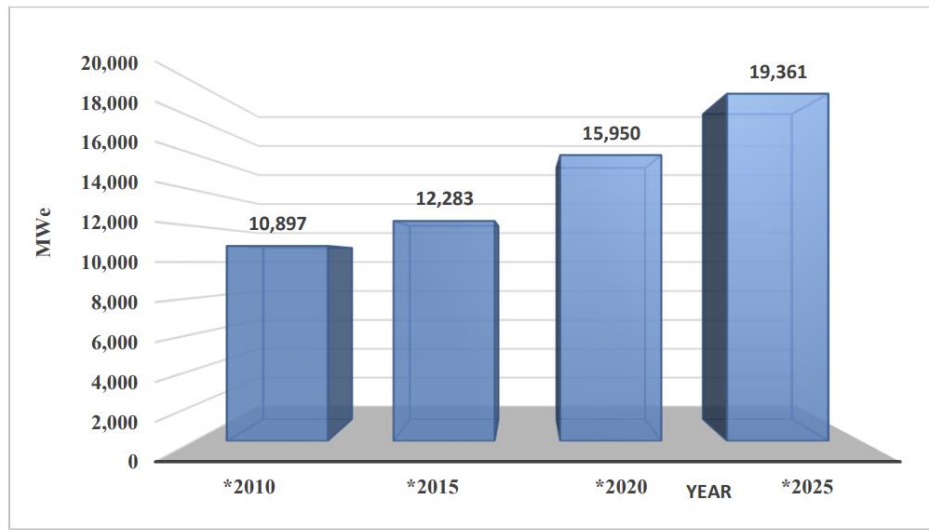
İtalya (944 MW)

Kenya (861 MW)

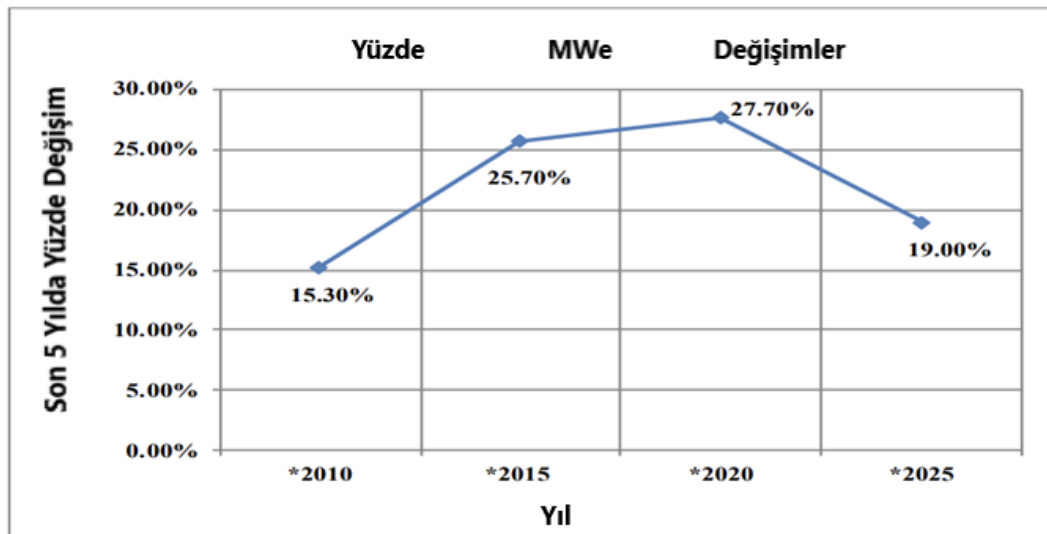
İzlanda (755 MW)

Japonya (603 MW)

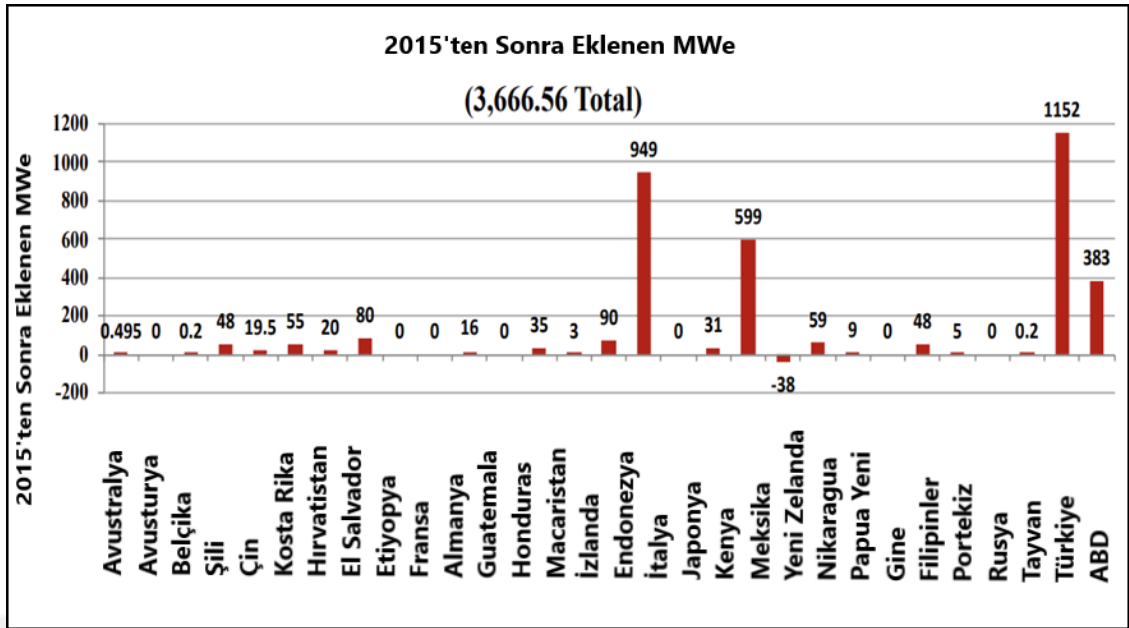
Şekil 1-7, 2010'dan bu yana dünyanın toplam kurulu kapasitesinin eğilimlerini gösterirken, Şekil 1-8 her 5 yıl için yüzde değişimi göstermektedir. 2025 için öngörülen kapasite artışı tahminindeki düşüş dikkat çekmektedir. Bunun nedeni güneş, rüzgar ve doğal gazdan kaynaklanan rekabet ve birçok ulusal hükümetin yeni teknolojileri teşvik etme konusundaki tereddütleri ve fiyatla ilgili olduğu düşünülmektedir. Şekil 1-9, son 5 yılda eklenen kurulu gücü (MWe) grafiksel olarak göstermektedir. Şekil 1-10 dünyadaki jeotermal santralleri harita üzerinde göstermektedir. Tablo 1-3 ise 2015'ten 2020'ye kadar jeotermal enerji ve enerji üretim istatistiklerini vermektedir.



Şekil 1-7: 2010'dan 2025'e dünyada toplam kapasite



Şekil 1-8: 2010' dan 2025'e toplam kapasitedeki yüzde değişim



Şekil 1-9: 2015'ten sonra eklenen kapasite



Şekil 1-10: Dünya üzerinde jeotermal santraller

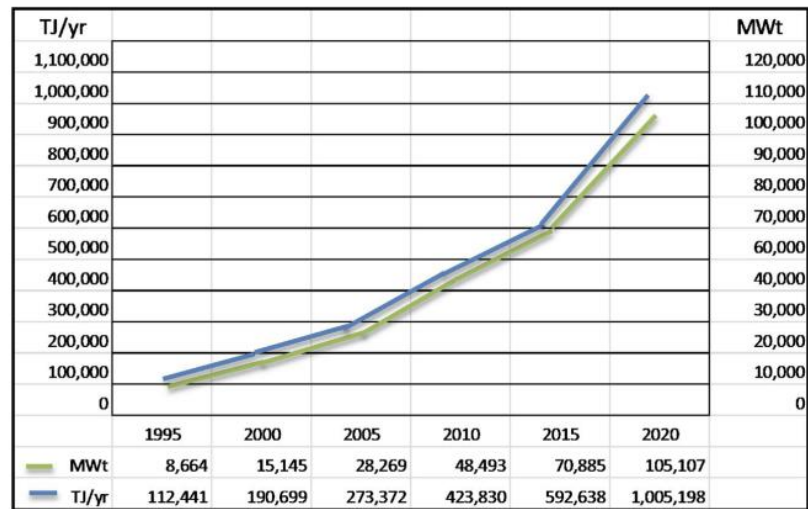
Tablo 1-3: 2015'ten 2020'ye kadar jeotermal enerji ve enerji üretim istatistikleri

Ülkeler	Kurulu Güç MWe 2015	Enerji GWh/yıl 2015	Kurulu Güç MWe 2020	Enerji GWh/yıl 2020	Tahmin 2025 MWe	2015 Sonrası artış MWe
Arjantin	0.00	0.00	0.00	0.00	30.00	0.00
Avustralya	1.10	0.50	0.62	1.70	0.31	-0.48
Avusturya	1.40	3.80	1.25	2.20	2.20	-0.15
Belçika	0.00	0.00	0.80	2.00	0.20	0.80
Şili	0.00	0.00	48.00	400.00	81.00	48.00
Çin	27.00	150.00	34.89	174.60	386.00	7.89
Kosta Rika	207.00	1,511.00	262.00	1,559.00	262.00	55.00
Hırvatistan	0.00	0.00	16.50	76.00	24.00	16.50
El Salvador	204.00	1,442.00	204.00	1,442.00	284.00	0.00
Etiyopya	7.30	10.00	7.30	58.00	31.30	0.00
Fransa	16.00	115.00	17.00	136.00	~25	1.00
Almanya	27.00	35.00	43.00	165.00	43.00	16.00
Guatemala	52.00	237.00	52.00	237.00	95.00	0.00
Honduras	0.00	0.00	35.00	297.00	35.00	35.00
Macaristan	0.00	0.00	3.00	5.30	3.00	3.00
İzlanda	665.00	5,245.00	755.00	6,010.00	755.00	90.00
Endonezya	1,340.00	9,600.00	2,289.00	15,315.00	4,362.00	949.00
İtalya	916.00	5,660.00	916.00	6,100.00	936.00	0.00
Japonya	519.00	2,687.00	550.00	2,409.00	554.00	31.00
Kenya	594.00	2,848.00	1,193.00	9,930.00	600.00	599.00
Meksika	1,017.00	6,071.00	1,005.80	5,375.00	1,061.00	-11.20
Nikaragua	159.00	492.00	159.00	492.00	159.00	0.00
N. Z.	1,005.00	7,000.00	1,064.00	7,728.00	200.00	59.00
P.N.G.	50.00	432.00	11.00	97.00	50.00	-39.00
Filipinler	1,870.00	9,646.00	1,918.00	9,893.00	2,009.00	48.00
Portekiz	29.00	196.00	33.00	216.00	43.00	4.00
Rusya	82.00	441.00	82.00	441.00	96.00	0.00
Tayvan	0.10	1.00	0.30	2.60	162.00	0.20
Türkiye	397.00	3,127.00	1,549.00	8,168.00	2,600.00	1,152.00
USA	3,098.00	16,600.00	3,700.00	18,366.00	4,313.00	602.00

Tablo 1-3 (devamı): 2015'ten 2020'ye kadar jeotermal enerji ve enerji üretim istatistikleri

Ülkeler	Kurulu Güç MWe 2015	Enerji GWh/yıl 2015	Kurulu Güç MWe 2020	Enerji GWh/yıl 2020	Tahmin 2025 MWe	2015 Sonrası artış MWe
Yakın Zamanlı Potansiyel Enerjiler						
Dominika	0.00				7.00	
Montserrat	0.00				3.00	
Nevis	0.00				9.00	
St. Lucia	0.00				30.00	
St. Vincent	0.00				10.00	
Kanada	0.00				10.00	
Yunanistan	0.00				30.00	
İran	0.00				5.00	
Ekvador	0.00				50.00	
Toplam	12,283.90	73,550.30	15,950.46	95,098.40	19,331.01	3,666.56

Dünya çapında 2020 yılı sonu itibariyle jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı ile ilgili belirlenen toplam kurulu kapasite 105,107 MWt'dir. Yıllık enerji kullanımı toplam 1,005.198 TJ/yıl'a ulaşmıştır. Kurulu kapasite büyüme oranları ve son 30 yılda yıllık enerji kullanımı Şekil 1-11' de özetlenmiştir [18]. Tablo 1-4 dünya genelinde bölgeye ve kıtaya göre kurulu termal kapasite (MWt), yıllık enerji kullanımı (TJ/yıl ve GWh/yıl) ve kapasite faktörlerinin 2019 yılı için özetini vermektedir.



Şekil 1-11: Küresel doğrudan kullanım kurulu kapasite ve büyüme oranları

Tablo 1-4: Dünya genelinde bölge ve kıtaya göre doğrudan kullanım verilerinin özeti, 2019

Bölge/Kıta	Kapasite			
Ülkeler/Bölgeler	MWt	TJ/yıl	GWh/yıl	Faktörü
Afrika (11)	198	3730	1036	0.597
Amerika (17)	23,330	180,414	50,115	0.245
Orta Amerika ve				
Karayipler	9	195	54	0.687
Kuzey Amerika (4)	22,700	171,510	47,642	0.24
Güney Amerika (8)	621	8709	2419	0.445
Asya (18)	49,079	545,019	151,394	0.352
Bağımsız Milletler				
Topluluğu (5)	2121	15,907	4419	0.238
Avrupa (34)	32,386	264,843	73,568	0.259
Orta ve Batı				
Avrupa (17)	3439	28,098	7805	0.259
Batı ve Kuzey				
Avrupa (17)	28,947	236,745	65,762	0.259
Okyanusya (3)	613	10,974	3048	0.568
Toplam (88)	107,727	1,020,887	283,580	0.300

Jeotermal (yer kaynaklı) ısı pompası sistemlerinin önemi ve popülerliği, jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı üzerinde en önemli etkiyi göstermiştir. Kurulu kapasitede (MWt) en büyük doğrudan kullanımlı (jeotermal ısı pompalı) beş ülke: Çin, ABD, İsveç, Almanya ve Türkiye dünya kapasitesinin %71,1'ini ve en büyük yıllık enerji kullanımına sahip beş ülke jeotermal ısı pompaları ile (TJ/yıl): Çin, ABD, İsveç, Türkiye ve Japonya, dünya kullanımının %73.4'ünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte verilerin arazi alanı veya nüfus açısından incelenmesi, daha küçük ülkelerin, özellikle de İskandinav ülkelerinin hakim olduğunu göstermektedir. Kurulu kapasite (MWt/nüfus) açısından ilk beş ülke; İzlanda, İsveç, Finlandiya, İsviçre ve Norveç ve yıllık enerji kullanımı için (TJ/yıl/nüfus) ilk beş ülke İzlanda, İsveç, Finlandiya, Norveç ve Yeni Zelanda olmuştur. Kurulu kapasite için arazi alanı (MWt/alan) açısından ilk beş ülke İsviçre, Hollanda, İzlanda, İsveç ve Avusturya'dır ve yıllık enerji kullanımı (TJ/yıl/alan) açısından liderler: İsviçre, İzlanda, İsveç, Macaristan ve Avusturya'dır. Son beş yılda

jeotermal kurulu kapasitedeki (MWt) en büyük yüzde artışı İzlanda, Macaristan, Fransa, Mısır ve Avustralya'da gerçekleşmiştir ve yıllık enerji kullanımı (TJ/yıl) açısından son beş yılda en büyük yüzde artış İspanya, Yemen, Avustralya, Kenya ve Gürcistan'da olmuştur. Bu artışların çoğu, jeotermal ısı pompası kurulumlarından veya banyo ve yüzme kullanımlarından kaynaklanmaktadır. 1985'te sadece 11 ülkede kurulu kapasite söz konusuysen bu sayı 1995'te 14'e, 2000'de 15'e, 2005'te 23'e, 2010'da 33'e, 2015'te 36'ya ve 2020'de 38 ülkeye yükselmiştir [18].

Tablo 1-5, 1-6 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 ve 2020 verilerini kapasite (MWt), enerji kullanımı (TJ/yıl) açısından çeşitli kullanım alanları olarak göstermektedir. Bölgesel ısıtma sistemleri kurulu kapasitenin %91'ini oluşturmakta ve yıllık enerji kullanımının %59'unu temsil etmektedir. Kar erimesi, kar eritme/iklimlendirme kategorisinin çoğunluğunu (> %90) temsil eder. "Diğer" hayvancılık, spirulina yetiştiriciliği ve alkolsüz içeceklerin karbonatlanması içerdiği bilinen çeşitli kullanımları kapsayan bir kategoridir.

Tablo 1-5: 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 ve 2020 verileri ile kapasite değerleri (MWt)

Kullanım	Kapasite (MWt)					
	2020	2015	2010	2005	2000	1995
Jeotermal ısı						
pompaları	77,547	50,258	33,134	15,384	5,275	1,854
Hacim ısıtma	12,768	7,602	5,394	4,366	3,263	2,579
Sera Isıtması	2,459	1,972	1,544	1,404	1,246	1,085
Su ürünleri yetiştirme						
havuz ısıtması	950	696	653	616	605	1,097
Tarımsal kurutma	257	161	125	157	74	67
Endüstriyel kullanım	852	614	533	484	474	544
Kaplıca ve yüzme						
havuzu	12,253	9,143	6,700	5,401	3,957	1,085
Soğutma/kar eritme	435	360	368	371	114	115
Diğer	106	79	42	86	137	238
Toplam	107,727	70,885	48,493	28,269	15,145	8,664
% 5 yılda artış	52.0	46.2	71.5	86.7	74.8	

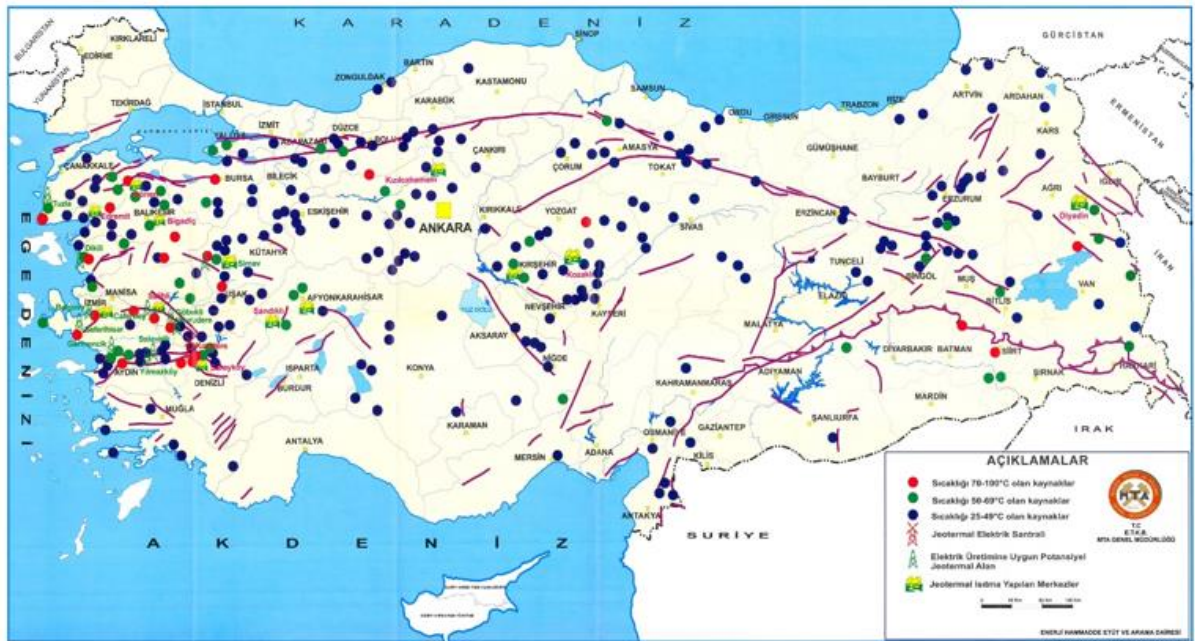
Türkiye’de jeotermal sahaların araştırılması sırasında yapılan jeolojik araştırmalar sonucunda belirlenen ve jeolojik sistemlerin çeşitliliği, beslenme koşulları ve boşalım koşulları, jeolojik ve jeofiziksel unsurlar dikkate alındığında jeodinamik süreçler kapsamında ortaya çıkan jeotermal sistemlerdeki kaynaklar tektonizma ve volkanizma ile ilişkili olarak Türkiye’nin her bir bölgesine dağılmışlardır. Başka bir deyişle, yerküre üzerinde aktif tektonik ve volkanik kuşaklar üzerinde yer alan, buna bağlı olarak tektonik yapısının biçimlendiği ve volkanik etkinliklerin geliştiği ülkemizi, oldukça zengin jeotermal kaynak varlığına ve bu açıdan ekonomik potansiyele sahip hale getirmiştir.

Şekil 1-12’de Türkiye jeotermal kaynakların dağılımı ve uygulama haritası görülmektedir [19]. Türkiye, yüzeyle doğal olarak boşalan sıcak su kaynakları ve bazı sahalardaki fümerol çıkışlarıyla kaynak zenginliği açısından dünyanın 7. ülkesidir ve sıcaklık alt sınırı 20 °C olarak kabul edildiği Avrupa’da ise birinci sıradadır [20]. Türkiye’nin jeotermal enerji potansiyeli teorik olarak 31,500-60,000 MWt arasında tahmin edilmektedir. Fiili olarak kullanılabilir teknik kapasitesi ise 4809 MWt olarak hesaplanmaktadır. Günümüze kadar tahmin edilen teknik kapasitenin 2880 MWt’lik bir kısmı kanıtlanmıştır [21].

Tablo 1-6: 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 ve 2020 verileri ile enerji kullanım değerleri (TJ/yıl)

Kullanım TJ/yıl	2020	2015	2010	2005	2000	1995
Jeotermal ısı pompaları	599,981	326,848	200,149	87,503	23,275	14,617
Hacim ısıtma	162,979	88,668	63,025	55,256	42,926	38,230
Sera ısıtma	35,826	29,038	23,264	20,661	17,864	15,742
Su ürünleri ve havuz ısıtma	13,73	11,953	11,521	10,976	11,733	13,493
Tarımsal işlem kurutma	3,529	2,030	1,635	2,013	1,038	1,124
Endüstriyel kullanım	16,390	10,454	11,745	10,868	10,220	10,120
Kaplıca ve yüzme	184,070	119,611	109,410	83,018	79,546	15,742
Soğutma / kar eritme	2,589	2,596	2,126	2,032	1,063	1,124
Diğer	1,950	1,440	955	1,045	3,034	2,249
Toplam	1,020,88	592,638	423,830	273,372	190,699	112,441
% 5 yıllık artış	72.3	39.8	55.0	43.4	69.6	

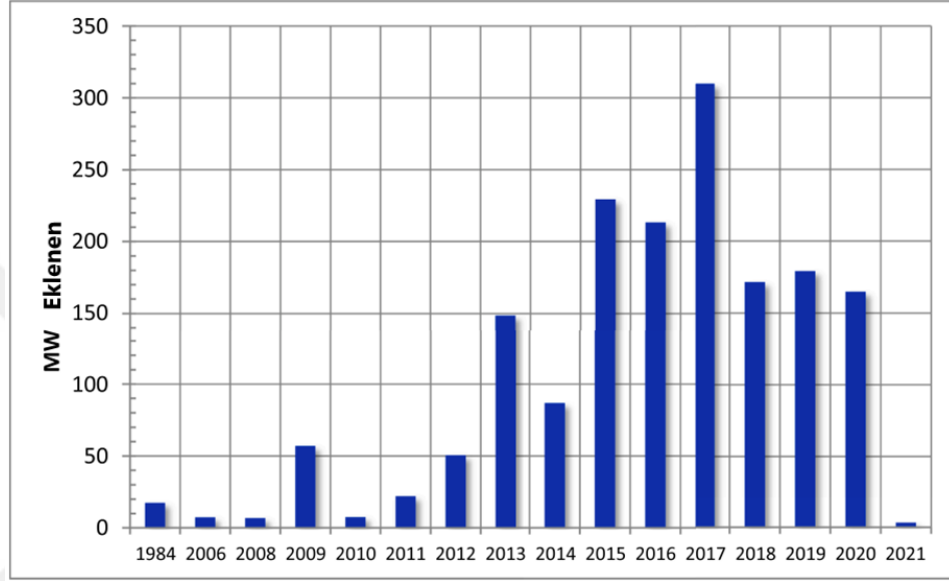
Türkiye’de, sıcaklığı 30 °C’nin üzerinde olan 346 adet jeotermal saha bulunmaktadır. Bu rakam doğal kaynaklarla birlikte ve jeotermal kuyularla enerji elde edilen tüm sahaları içermektedir. Bu jeotermal sahaların dağılımı, %88 oranında düşük ve orta sıcaklıklı kaynaklar ve %12 oranında sıcaklığı 295 °C’ye kadar varan yüksek sıcaklıklı kaynaklar şeklindedir. Jeotermal enerjiden elektrik eldesi için yüksek sıcaklıklı kaynaklardan faydalanılmaktadır. Orta sıcaklıklı kaynaklardan konut ısıtma, sera ısıtma ve çeşitli kurutma sistemlerinde faydalanılmaktadır. Düşük sıcaklıklı kaynaklardan ise yüzme havuzlarında, balneoterapi uygulamalarında ve balık çiftlikleri gibi tesislerde yararlanılmaktadır [20, 21].



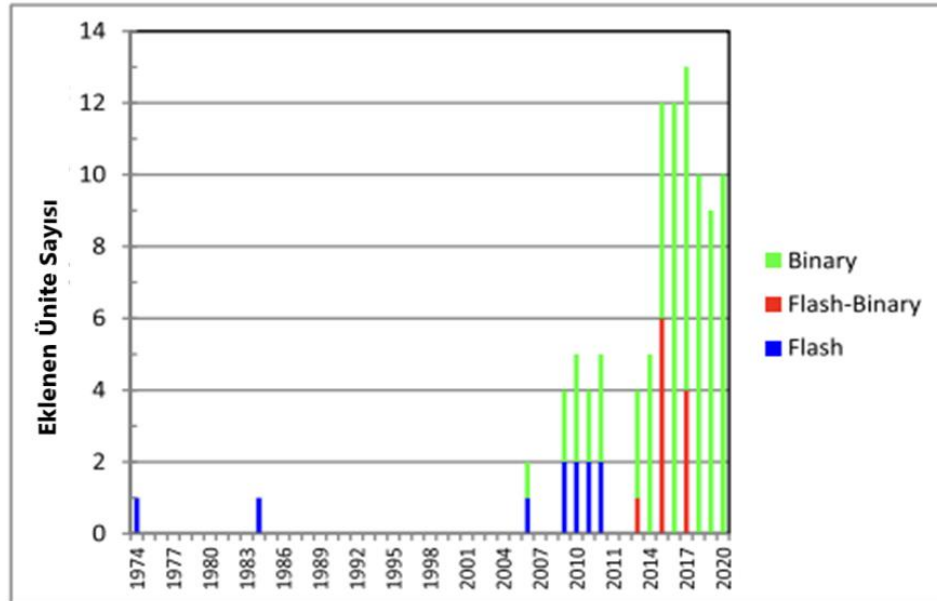
Şekil 1-12: Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası

Türkiye’de, ilk jeotermal elektrik santrali 0.5 MW kapasitesinde bir pilot santral olup 1974’te Kızıldere Jeotermal Alanında MTA Genel Müdürlüğü tarafından kurulmuştur. Pilot santral kurulmadan önce sahada 15 kuyu açılmıştır. 1968 yılında açılan ilk iki kuyu KD-1 ve KD-2, Türkiye’de jeotermal gelişimin başlangıcı olmuştur. Bu kuyular 540 m ve 769 m derinliğinde kuyulardır. Rezervuarda ölçülen jeo akışkanın sıcaklıkları ise 198 °C ve 174 °C’dir [22]. Daha sonra Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi için ilk ticari santral 1984 yılında 17.4 MWe kapasite ile kurulmuştur. Takip eden yıllarda geliştirme süreci uzun ve yavaş olarak ilerlemiş ve 2010 yılına kadar kurulu kapasite açısından önemli olmayan 100 MWe’e ulaşmıştır [23]. Haziran 2019 yılı itibarıyla ise elektrik üretimi için toplam kurulu güç 1,549 MWe olmuştur [24]. Sıcaklık baz

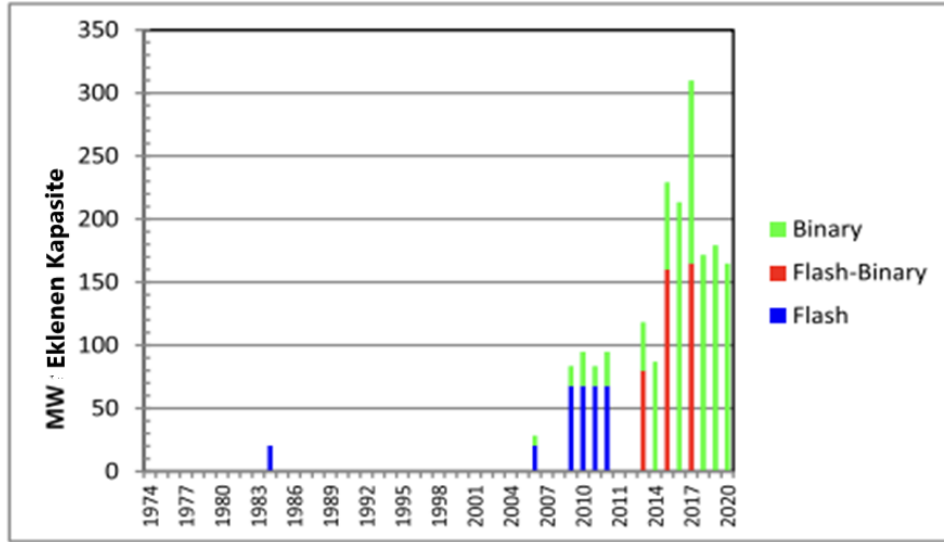
alındığında Aydın Germencik-Ömerbeyli, Denizli Kızıldere, Çanakkale Tuzla, Aydın Salavatlı ve Kütahya Simav jeotermal sahaları yüksek entalpili sahalardır ve elektrik enerjisi üretimi için uygun sahalardır. Şekil 1-13 1984-2020 yılları arası her yıl eklenen kapasite değerlerini vermektedir. 2021 henüz tamamlanmamıştır. Şekil 1-14, 1-15 santral tiplerine göre her yıl eklenen ünite sayısı ve güç değerlerini vermektedir.



Şekil 1-13: Türkiye’de her yıl eklenen Jeotermal güç kapasiteleri



Şekil 1-14: Türkiye’de santral tipine göre her yıl eklenen ünite sayısı

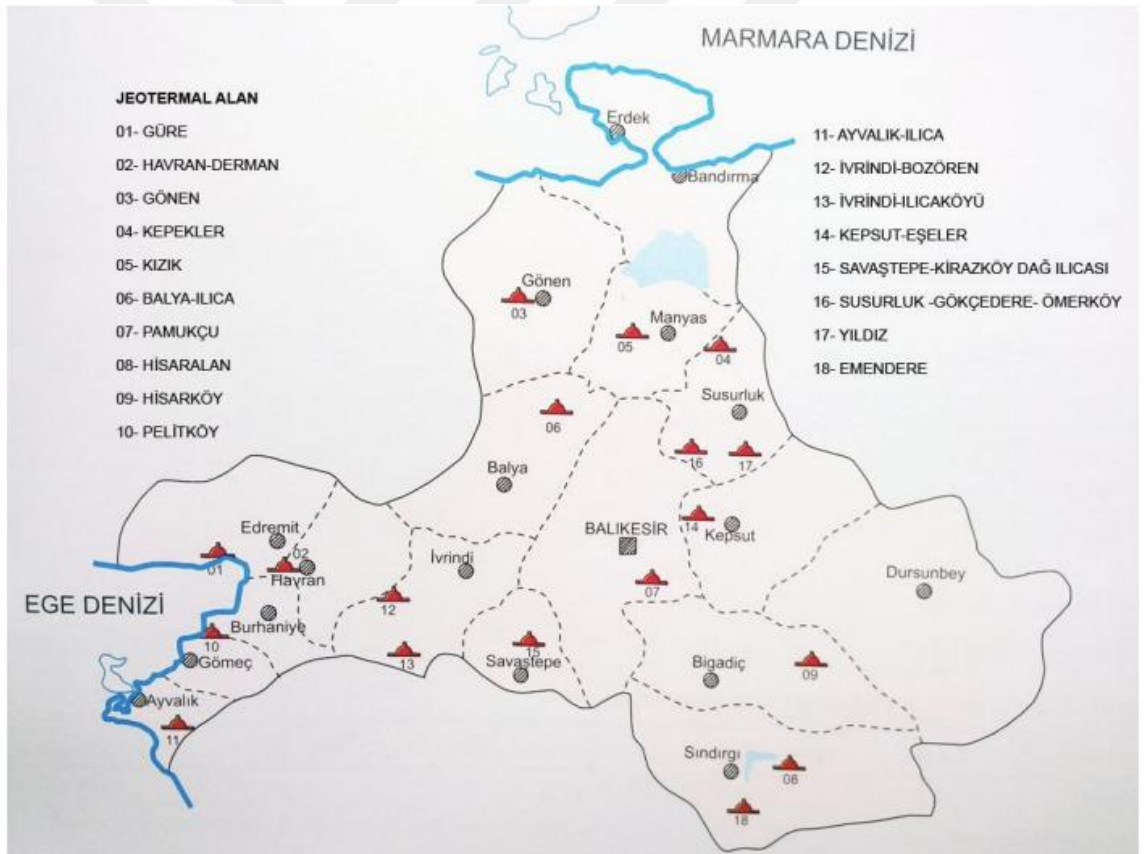


Şekil 1-15: Türkiye’de santral tipine göre her yıl eklenen kapasite

Türkiye’de jeotermal enerjiden doğrudan faydalanma bakımından ise aktif olan 17 adet bölgesel ısıtma sistemi bulunmaktadır. Bu sistemlerin bir kısmında 40–45 °C’ye kadar düşük sıcaklıkta jeotermal akışkan kullanılabilir. Bununla birlikte Türkiye’de önemli bir kısmı batı bölgelerinde olan altı adet büyük sera alanı bulunmaktadır. Seraların yüzey alanı toplam 4.3 milyon m²’ye ulaşmaktadır. Genellikle seralarda domates yetiştirilmekte olup, bu domateslerin %10’u ülke içinde tüketilmekte ve kalanı Rusya ve Avrupa’nın büyük pazarlarına ihraç edilmektedir. Ayrıca özellikle son yıllarda yatırımların artmasıyla birlikte, yirmi milyondan fazla yerli ve 20.000’den fazla yabancı ziyaretçi Türkiye’de jeotermal enerjiden balneolojik olarak faydalanmaktadır. 450 adet termal kaplıca olmak üzere 46,400 konutun eşdeğeri kaplıca ve otel gibi tesislerinde ısıtması sağlanmaktadır. Özet olarak, Türkiye’de doğrudan kullanım uygulamaları olarak kurulu güç ve yıllık enerji kullanımı: bölgesel ısıtma için 1033 MWt ve 11,402 TJ/yıl, bireysel alan ısıtma için 420 MWt ve 4635 TJ/yıl, sera ısıtması için 820 MWt ve 15,516 TJ/yıl, iklimlendirme için 0.35 MWt ve 10.0 TJ/yıl, tarımsal kurutma için 1.5 MWt ve 50 TJ/yıl, banyo ve yüzme havuzları için 1205 MWt ve 22.800 TJ/yıl ve ısı pompaları için 8,5 MWt ve 171 TJ/yıl kapasitelerinde kullanılmaktadır. Toplam kapasite ise 348,835 MWt ve 54,584 TJ/yıl’dır [18].

1.3 BALIKESİR İLİ JEOTERMAL KAYNAKLAR

Balıkesir ili Türkiye’de jeotermal enerji potansiyeli il sıralamasında ön sıralarda bulunmaktadır. MTA Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen çalışmalarda il genelinde 30°C ve daha yüksek sıcaklığa sahip 7 adet jeotermal saha belirlenmiştir. Güre, Edremit-Derman, Gönen, Kepekler, Balya-Dağ Ilıcası, Balıkesir-Pamukçu, Bigadiç-Hisarköy, Manyas-Serpin, Sındırgı-Hisaralan ve Susurluk-Yıldız Köy bölgelerinde önemli jeotermal sıcak su kaynakları bulunmaktadır. Balıkesir’de bulunan jeotermal kaynaklar düşük ve orta sıcaklıklı kaynak kategorisine girmektedir. Bu nedenle konut ısıtma, sera ısıtma, kaplıca gibi doğrudan kullanım alanları için kullanılmaktadır [12]. Şekil 1-16’te Balıkesir ili jeotermal kaynakları haritası ve Tablo 1-7 hesaplanan toplam muhtemel potansiyel verilmiştir [12].



Şekil 1-16: Balıkesir ili jeotermal kaynakları haritası

Tablo 1-7: Balıkesir ili hesaplanan toplam muhtemel potansiyel

Jeotermal saha	Hesaplanan toplam tahmin edilen potansiyel (MWt)
Gönen	100
Hisaralan	53.7
Hisarköy	35.8
Edremit-Derman	30
Edremit-Güre	19.5
Kepekler	18
Pamukçu	14
Susurluk-Yıldız	11.4
Balya-Ilıca	10
Kızık	2
Toplam	294.4

Güre Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden konut ısıtma ve kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Güre jeotermal sahası için hesaplanan tahmini potansiyel 19.5 MWt'dir. Hesaplamada 3 km²'lik alan, 48.2-58.2 °C kaynak sıcaklığı ve 400 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Havran- Derman Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden sera ısıtma, kaplıca amaçlı ve konutlar için sıcak su ihtiyacı karşılamada faydalanılmaktadır. Sahada 65 °C'ye ulaşan sondajlar yapılmıştır. Havran-Derman jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 30 MWt'dir. Hesaplamada 4 km²'lik alan, 25-57 °C kaynak sıcaklığı ve 400 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Gönen Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden konut ısıtma, sera ısıtma, kaplıca amaçlı ve konutlar için sıcak su ihtiyacı karşılamada ve endüstriyel amaçlı faydalanılmaktadır. Sahada doğal kaynak çıkışları 78 °C civarındadır. Gönen jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 100 MWt'dir. Hesaplamada 10 km²'lik alan, 34-78 °C kaynak sıcaklığı ve 300 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Kızık Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Kızık jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 2 MWt'dir. Hesaplama 1 km²'lik alan, 49 °C kaynak sıcaklığı ve 200 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Kepekler Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Kepekler jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 18 MWt'dir. Hesaplama 3 km²'lik alan, 31-62 °C kaynak sıcaklığı ve 300 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Balya- Ilıca (Şamlı) Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden kurutma-yıkama amaçlı çamaşırhanelerde faydalanılmaktadır. Balya jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 10 MWt'dir. Hesaplama 2 km²'lik alan, 51-60 °C kaynak sıcaklığı ve 300 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Pamukçu Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden konut ısıtma ve kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Pamukçu jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 14 MWt'dir. Hesaplama 3 km²'lik alan, 26-68 °C kaynak sıcaklığı ve 300 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Hisaralan Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden konut ısıtma, sera ısıtma, kaplıca amaçlı, konutlar için sıcak su ihtiyacı karşılama ve ürün kurutma alanlarında faydalanılmaktadır. Hisaralan jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 53.7 MWt'dir. Hesaplama 3 km²'lik alan, 27-98.5 °C kaynak sıcaklığı ve 400 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Hisarköy Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden konut ısıtma, termal tesis ısıtma ve kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Hisarköy jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 35.8 MWt'dir. Hesaplama 2 km²'lik alan, 25-94 °C kaynak sıcaklığı ve 400 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Pelitköy Jeotermal Sahası

Jeotermal kaynak suyundan içme suyu olarak faydalanılmaktadır. Pelitköy jeotermal sahasının kaynak sıcaklığı 35 °C'den daha düşük sıcaklıkta olduğu için potansiyel hesabında dikkate alınmamıştır.

Ayvalık - Ilıca Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden kaplıca amaçlı faydalanılmaktadır. Ayvalık - Ilıca jeotermal sahasının kaynak sıcaklığı 35 °C'den daha düşük sıcaklıkta olduğu için potansiyel hesabında dikkate alınmamıştır.

İvrindi - Bozören Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden herhangi bir alanda faydalanılmamaktadır. İvrindi - Bozören jeotermal sahasının kaynak sıcaklığı 35 °C'den daha düşük sıcaklıkta olduğu için potansiyel hesabında dikkate alınmamıştır.

İvrindi-Ilıca-Gümeli Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden basit kaplıca uygulaması şeklinde faydalanılmaktadır.

Kepsut - Eşeler Ilıcası Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden herhangi bir alanda faydalanılmamaktadır. İvrindi - Bozören jeotermal sahasının kaynak sıcaklığı 35 °C'den daha düşük sıcaklıkta olduğu için potansiyel hesabında dikkate alınmamıştır.

Savaştepe - Kirazköy Dağ Ilıcası Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden hamamlar ve çamaşır yıkama gibi alanlarda faydalanılmaktadır. Jeotermal kaynağın sıcaklık değeri 31-40 °C'dir.

Susurluk Gökçedere - Ömerköy Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden hamamlar ve banyolar alanlarında faydalanılmaktadır.

Susurluk - Yıldız Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden basit kaplıca uygulaması şeklinde faydalanılmaktadır. Susurluk- Yıldız jeotermal sahası için hesaplanan potansiyel 11.4 MWt'dir. Hesaplama 2 km²'lik alan, 56-75 °C kaynak sıcaklığı ve 200 m rezervuar kalınlığı dikkate alınmıştır.

Emendere Jeotermal Sahası

Jeotermal enerjiden basit kaplıca uygulaması şeklinde faydalanılmaktadır. Emendere jeotermal sahasının kaynak sıcaklığı 35 °C'den daha düşük sıcaklıkta olduğu için potansiyel hesabında dikkate alınmamıştır.

Balıkesir ilinde jeotermal kaynakların önemli bir bölümünden konut ısıtmasında faydalanılmaktadır. İl genelinde Gönen, Bigadiç, Güre, Edremit ve Sındırgı olarak toplam 5 adet jeotermal bölgesel ısıtma sistemi halihazırda faaliyetini sürdürmektedir (Tablo 1-8). Türkiye'nin ilk jeotermal bölgesel ısıtma sistemi 1987 yılında kurulan Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sistemidir. Bigadiç jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ile Hisarköy'de bulunan jeotermal su 18 km isale hattı kullanılarak ve Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ile Hisaralan'da bulunan jeotermal su kullanılarak 23.7 km isale hattı kullanılarak şehirlerin ısıtılması sağlanmaktadır. Edremit jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde ısı merkezi bulunmayıp bina altı eşanjör sistemi ile konut ısıtma gerçekleştirilmektedir. Bölgede kurulu jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri ile yaklaşık 12,000 konut eşdeğer civarında ısıtma gerçekleştirilmektedir [25].

Tablo 1-8: Balıkesir jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri

Tesis No	Tesis Adı	KE (Konut Eşdeğeri)	Kuruluş Yılı	Ortalama Sıcaklık (°C)
1	Gönen JBIS	2100	1987	67
2	Edremit JBIS	5200	2003	60
3	Bigadiç JBIS	1812	2005	96
4	Güre JBIS	1400	2003	60
5	Sındırgı JBIS	2100	2015	98

1.4 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Davraz vd. [26] çalışmalarında, Türkiye'nin jeotermal kaynaklar açısından ikinci büyük potansiyeline sahip jeopolitik bölgesi olan İç Anadolu'da Konya tarafından denetlenen illerdeki jeotermal sistemleri incelemişlerdir. Bölgedeki illerde bulunan jeotermal sahaların hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri Konya Ovası Projesi (KOP)-Aksaray, Karaman, Kırıkkale, Kırşehir, Konya, Niğde, Nevşehir ve Yozgat toplu olarak Türkiye'nin toplam alanının %12.2'sini kaplamakta ve 39 jeotermal saha içermektedir. Çalışma alanında, jeotermal akışkanlar turizm, seracılık, şehir ısıtması ve endüstriyel amaçlarla kullanılmaktadır. Yazarlar çalışmalarının sonuçlarında, bölgede 166 adet kuyu ve 35 adet doğal sıcak su kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışma alanında 5 adet reenjeksiyon kuyusu bulunduğunu da ifade etmişlerdir. Bununla birlikte bu reenjeksiyon kuyularının kullanımının da karbonat veya silika çökeltme ve yüksek pompalama maliyetleri gibi sorunların ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Reenjeksiyon işleminin çevre koruma açısından, rezervuarın beslenmesi ve jeotermal sistemin sürdürülebilirliği açısından önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle reenjeksiyon kuyularının özellikle olduğu bölgelerde artırılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Kecebaş [27] çalışmasında, Afyon jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerjetik ve ekserjetik bir analizin yanı sıra ekonomik ve çevresel değerlendirmesini de ele almıştır. Analizde gerçek sistem verileri kullanılmış ve bölgesel ısıtma sisteminin performansının belirlenmesi için enerji ve ekserji verimliliği, özgül ekserji indeksi, enerji ve ekserji kayıpları ve iyileştirme potansiyeli hesaplanmıştır. Ayrıca teknik departmandan elde edilen fiili veriler kullanılarak ekonomik ve çevresel değerlendirmeler de yapılmıştır. Enerji ve ekserji kayıplarının nerelerde meydana geldiğini göstermek için akış diyagramları çizilmiştir. Sistem performans analizi ve iyileştirme için hem enerji hem de ekserji verimliliği toplam AJBIS 'nin sırasıyla %34.86 ve %48.78 olduğu belirlenmiştir. Isı ve güç sistemlerindeki iyileştirmelerin, çevresel olarak enerji güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olabileceğini belirtmiştir.

Eslami vd. [28] çalışmalarında, ekonomik ve çevresel açılardan beş farklı ısı pompası (HP), güneş enerjisi (ST), fotovoltaiik (PV) kombinasyonlarını içeren genel senaryolar ile sistem, pil (BT) ve ısı depolama (HS) ile ilgili en etkili senaryoyu belirlemek için analizler yapmışlardır. Sonuçlarda tüm senaryoların CO₂ emisyonlarını azaltabileceğini göstermektedir; bununla birlikte, toplam birincil enerjideki %21.8'lik azalma nedeniyle ST ve HP kombinasyonu en düşük maliyete sahiptir.

Aslan vd. [29] Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin (JBIS) farklı çalışma koşullarının yıllık enerji ve ekserji performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sıcaklık, basınç ve debi gibi sistem parametreleri sabit ve taşınabilir ölçüm aletleri kullanılarak bir yıl boyunca izlenerek gerçek veriler elde edilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Böylece yıllık sistem işletimindeki temel farklılıklar tespit edilmiştir. Ölçümlere göre Gönen JBIS'nin yıl boyunca dış sıcaklığa bağlı olarak altı farklı çalışma durumuna sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her bir çalışma durumu için sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tüm sistemin en yüksek ve en düşük enerji ve ekserji verimleri sırasıyla (%57.32, %35.64) ve (%55.76, %41.42) olarak elde edilmiştir. En yüksek verim 15.26 °C referans sıcaklığında ve en düşük verim 3.86 °C referans sıcaklığında elde edilmiştir. Ayrıca altı durum bazlı enerji ve ekserji analizinin hesaplanmasıyla, yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri %45.24 ve %47.33 olarak belirlenmiştir.

Yamankaradeniz [30] bir jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin termodinamik performans değerlendirmesini yapmıştır. Çalışmasında sistem bileşenleri ve sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri belirlemek için gelişmiş ekserjetik analiz kullanmıştır. Tükenme oranı, ekserjetik üretkenlik eksikliği oranı, ekserjetik rehabilitasyon oranı ve ekserjetik olarak dört yeni ekserjetik parametre tanımlanmıştır. Bu analiz ve yeni ekserjetik parametreler Bursa iline uygulanmıştır. Sonuçlar, gelişmiş ekserjetik analizin daha anlamlı ve etkili olduğunu göstermektedir. Sistem performans değerlendirmesi için ekserjetik verimlilikler konvansiyonel ve gelişmiş olanlar sırasıyla %25.24 ve %26.34 olarak elde edilmiştir.

Stegnar vd. [31] çalışmalarında bireysel ve bölgesel ısıtma sistemlerinin jeotermal enerji potansiyelini tanımlayan bir çerçeve önermektedir. Analiz için ana kriterleri zemin sıcaklığı, termal iletkenlik, ısı akışı ve ısı kapasitesi olarak ele almışlardır. Yazarlar, potansiyel yeni bölgesel ısıtma alanlarının tanımlanması için uygun maliyetli bir alan yöntemi sunarken, sağlanan ısının maliyet rekabetçiliği göz önüne alındığında kentsel ve kırsal alanlar için ayrı ayrı rekabet eden teknolojilerin maliyet etkinliği ekonomik potansiyel esas alınarak belirleneceğini ifade etmişlerdir. Sonuçlarda Slovenya'daki teknik bölgesel ısıtma potansiyelinin %54'ü kullanılmamış olmasına rağmen, geleceğin Jeotermal enerji sistemlerinin ağırlıklı olarak uygun jeolojik veya hidro-jeolojik koşullara sahip yerlerde uygun maliyetli olan bireysel sistemleri olduğunu belirtmişlerdir.

Yazıcı [32] çalışmasında 2011–2013 yılları arasında Afyon ilinde tamamen yenilenen Afyon Jeotermal Isıtma Sisteminin ekserji ve enerji analizlerini yapmıştır. Karşılaştırma amacıyla hem enerji hem de ekserji akış diyagramları sunulmuştur. Analizlerde, sistemdeki ekserji yıkımının özellikle yeniden enjekte edilen termal suyun (jeotermal akışkan) ekserjisinden kaynaklandığı (%15.94) ifade edilmiştir. Diğer kayıplar ısı eşanjörü kayıpları, pompa kayıpları

ve boru hattı kayıpları sırasıyla %12.44, %5.52 ve %5.52 olarak ortaya çıkmıştır. Tüm sistemin hem enerji hem de ekserji verimleri sırasıyla %46.17 ve %60.63 olarak elde edilmiştir.

Arat ve Arslan [33] çalışmalarında yaklaşık 25,000 nüfusa sahip bir ilçe merkezi için ekserji ve ekonomik açıdan bir değerlendirme yaparak jeotermal ısı pompası destekli bölgesel ısıtma sistemini araştırmışlardır. Çalışmada bölgesel ısıtmanın optimum çözümünü bulmak için 12 adet farklı akışkan incelenmiştir. Simav bölgesinin jeotermal kaynaklarının kullanıldığı sistemde boru tipi ısı eşanjörü kullanılmıştır. Bu amaçla, sıcaklık ve basınç gibi farklı sistem parametreleri ile 4686 tasarım ele alınarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. En ekonomik jeotermal ısı pompası sistemini belirlemek için Net Bugünkü Değer (NPV) analizi ile birlikte Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) birlikte değerlendirilmiştir. NPV analizi ile 7929 ile 46,098 arasında konutun ısıtılmasının mümkün olduğu tespit edilmiştir. Yazarlar kullanımını önerdikleri sistemin Simav bölgesi için cazip bir yatırım olacağını ifade etmişlerdir.

Chen vd. [34] çalışmalarında absorpsiyonlu ısı pompası ile güneş kaynaklarını bölgesel ısıtmaya entegre ederek bir sistem oluşturmuşlardır. Ortaya çıkan hibrit sistem için nicel bir sürdürülebilirlik modeli oluşturulmuştur. Enerji, çevre, ekonomik ve toplumsal yönleri ilişkin göstergeler kullanılmıştır. Sonuçlarda %100 fotovoltaiik kapsama oranına sahip bileşik parabolik yoğunlaştırıcı-fotovoltaiik/termal güneş kollektörüne bağlı bir bölgesel ısıtma sisteminin, yıllık maliyet tasarrufu söz konusu olduğunda vaka çalışması için ideal sistem olduğunu ifade etmişlerdir. Önerilen yaklaşımının, ideal hibrit sistemin seçilmesinde yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir.

Shamoushaki vd. [35] bir jeotermal enerji santralini enerji, ekserji, eksergo-ekonomik ve çevresel bakış açılarına göre analiz etmişlerdir. Kritik üstü ve kritik altı çevrimler için ekserji verimliliği sonuçları %52 ve %50.5'dir. Sonuçlar, yoğunlaşma sıcaklığının artırılmasının her iki çalışma durumunda ekserji verimini, net gücü ve ekserji performans parametrelerini azalttığını ve toplam ekserji yıkımını, eksergo-yok etme etkisini ve özgül güç maliyetini artırdığını göstermiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, süperkritik örnek olay incelemesinde türbinin giriş basıncındaki bir artış ekserji verimliliğini azaltmakta ve ekserjetik performans ve eksergo-imha etki faktörünü artırmaktadır.

Leveni vd. [36] çalışmalarında organik Rankine döngüsü (ORC) ve su/lityum bromür (LiBr) absorpsiyonlu soğutucu (ABS) soğutma ve güç üretim üniteleri için kademeli olarak bir düzenleme sunarak ele alınan sistemde bazı iyileştirmeler önermişlerdir. Sistemin performansını değerlendirmek için EES'de bir termodinamik model geliştirmişler ve enerji ve ekserji dengesini hesaplamışlardır. Önerilen sistem, İtalya Torre Alfina'da (TA) planlanan bir enerji santraline

karşılık gelen kaynak koşullarına referansla yeniden değerlendirilmiştir. Optimize edilmiş koşullar altında, tuzlu su reenjeksiyon kaybı ihmal edildiğinde, enerji kullanım faktörü %46.2 ve ekserji verimi %27.7 olarak ortaya çıkmaktadır. En yüksek ekserji yıkımları ORC ekonomizöründe (%8.6) olarak meydana gelirken ABS jeneratöründe (%6.3) ve soğurucuda (%5.5) olarak meydana gelmiştir.

Özcan vd. [37] çalışmalarında fotovoltaiik-ısı ile çalışan bir atık su kaynaklı ısı pompası sisteminin 4ES performansını değerlendirmişlerdir. Analizler 20 farklı durumu içeren EES simülasyonu ile gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, atık suyun 25,470 kW'a kadar bir enerji potansiyeline sahip olabileceğini ifade etmişlerdir. En yüksek ve en düşük ekserji verimliliği değerleri %2.85 ile %98.24 arasında değişmektedir. Çevresel etki faktörü (EEF) ve ekserjiye dayalı sürdürülebilirlik indeksi (ExSI) ise sırasıyla 0.58×10^{-5} ile 4.95×10^{-5} ve 3.97 ile 18.32 aralığında değişmektedir. Ayrıca çalışmaların da seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) 0.0801 ¢/kWh ile 0.1341 ¢/kWh arasında olacak şekilde modellenmiştir.

Açıkkalp vd. [38] çalışmalarında net sıfır ekserji binalarını yeni bir sistem olarak önermektedir. Bu konsept, şebekeden gelen elektriğin genişletilmiş ekserji hesabı ile binada üretilen elektrik arasında bir denge kurmaktadır. Önerilen metodoloji ısıtma ve soğutma mevsimleri için literatürde bulunan bir binaya uygulanmıştır. Sonuçlar binanın elektrik talebini karşılamak için 450Wp pik güç ve 44.181 kWh elektrik enerjisi elde edilmesi gerektiğini göstermektedir. Diğer bir yeni sonuç ise, PV paneller tarafından üretilen elektriğe göre hesaplanan ekserjinin, şebekeden alınan elektriğe göre hesaplanan ekserjiden daha büyük olmasıdır, bu da PV paneller tarafından üretilen elektriğin ekserji ayak izinin daha büyük olduğu anlamına gelmektedir.

Yüksel vd. [39] çalışmalarında Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerji ve ekserji performansını sezonluk değişimlere bağlı olarak incelemişlerdir. Enerji ve ekserji analizi sistemin ısıtma yükündeki mevsimsel değişimler incelenerek kış, yaz ve geçiş sezonları için hesaplanmıştır. Maksimum enerji ve ekserji verimleri geçiş sezonu için (%45.78 ve %50.45) elde edilirken, minimum enerji ve ekserji verimleri ise sırasıyla (%31.72 ve %39.34) kış sezonu için elde edilmiştir.

Etemoğlu ve Can [40] Türkiye'de çeşitli bölgelerde bulunan jeotermal kaynakları belirli ekserji oranlarına (SER) göre sınıflandırmışlardır. Ekserji analizinin hesaplanan sonuçlarının, kaynakların özelliklerini değerlendirmek için bir araç olarak kullanılabileceğini ve jeotermal kaynakların optimum uygulama alanı da tanımlamak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Türkiye'deki enerji ekonomisi çalışmalarına katkı sağlamak için çevre dostu, teknik ve ekonomik avantajlara sahip jeotermal kaynakların değerlendirilmesi gerektiğini ve jeotermal kaynakların

kullanımına yönelik araştırmaların, özellikle enerji optimizasyonuna dayalı olarak sürdürölmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Galantino vd. [41] Cornell Üniversitesi'nin karbon ayak izini düşürmek amaçlı, kampüs bölgesi enerji sistemine ısı sağlamak için düşük sıcaklıkta jeotermal enerji kullanmaya yönelik bir araştırma yapmışlardır. Bu analiz için, ısı pompası konfigürasyonları ile kaynak akışı, besleme ve dağıtım sıcaklıkları, tesis ısıtma tasarım seçenekleri, çıkış ısısı üretimi ve karbon azaltma sonuçları arasındaki nicel ilişkileri modellemişlerdir. Simölasyonların, rezervuarındaki tek bir kuyu çiftinin, yaklaşık 20 MWt ortalama kapasitede yıllık termal talebin neredeyse %68'ini karşılayabildiğini ve seviyelendirilmiş ısıtma maliyeti (LCOH) 4.55 \$'a kadar düşük olan geleneksel ısıtmaya kıyasla mali açıdan rekabetçi kalabildiğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Isı pompası takviyeli doğrudan kullanımlı bir şema, takviyesiz sisteme göre daha fazla karbon azaltımı ve %50 ila 150 daha fazla yıllık ısı tedariki sağladığını ifade etmişlerdir.

Lee vd. [42] Seul'de bölgesel ısıtma sistemi ile jeotermal kaynaklı ısı pompası sistemlerinin analizini yaparak, sistemleri karşılaştırmışlardır. Bölgede güneş enerjisi, güneş ısısı, jeotermal, güneş ışığı toplama, yakıt hücresi ve küçük uygulanabilir yenilenebilir enerjide kojenerasyon sistemlerinin bulunduğunu belirtmişlerdir. Bölgesel ısıtma tedarikçilerinin göre, yeni jeotermal ısı pompası sistemi ile ısıtmanın rakip bölgesel ısıtma pazarında boy gösterecek olduğunu ve yüksek verimliliği nedeniyle yurtdışındaki ısıtma alanında uygulanmasının tercih edilebileceğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, bölgesel ısıtma sisteminin birincil enerji kullanımı ve sera gazı azaltımı jeotermal ısı pompası sistemi ve diğerlerine göre daha fazladır.

Manente vd. [43] yenilenebilir enerji kaynakları ve atık yakıtlarla beslenen bölgesel ısıtma sistemlerinde iki ana operasyon optimizasyon stratejisinin uygulanmasının sonuçlarını araştırmışlardır. Uygulanan iki strateji: kısa vadeli ısı depolama sisteminin uygun bir şekilde yönetilmesi ve dağıtım ağının hidrolik performansının optimizasyonu şeklindedir. Öncelikle ısı talebini minimum maliyetle karşılamayı amaçlayan ünitelerin ana tasarım özellikleri ve ısı depolamasından tam olarak yararlanmayı sağlayan çevresel etki açıklanmıştır. Çalışma, bölgesel ısıtma sisteminin ana tasarımını ve işletim özelliklerini açıklamakta ve iyileştirilmiş işletimin elektrik ve doğal gaz tüketimini azaltmada nasıl başarılı olduğunu göstermektedir. Yeni basınç yönetimi, özellikle şebekenin çevresinde bulunanlar olmak üzere birçok ısı merkezindeki fark basıncını izlemeyi ve en kritik iki ısı merkezindeki minimum fark basıncını karşılamak için su besleme basıncını ayarlamayı içermektedir. Değiştirilmiş üretim planlaması, depolama sistemini günlük olarak şarj etmek için düşük termal talep ve düşük elektrik fiyatları dönemlerinde jeotermal enerji ve atıktan enerji santrallerini kullanmaya devam etmeyi içermektedir. Geliştirilmiş işletimin

hidrolik performansının önceki "manuel" optimizasyonuna kıyasla %30'luk bir tasarrufu temsil eden 400 MWh/yıl'a eşit pompalama için elektrik gücünde yüksek bir tasarruf potansiyeli göstermektedir. Ayrıca, gelişmiş depolama operasyonu, yıllık ısı talebine sadece %11 katkıda bulunan doğal gazdan 7000 MWh/yıl enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Alkan vd. [44] maliyete dayalı bilgi sağlamak için eksergoekonomik analiz ve maliyet etkinliğini artırmak için bir GDHS'deki (jeotermal merkezi ısıtma sistemi) olası konumları/bileşenleri öneren bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Analiz, SPECO (spesifik ekserji maliyeti) yöntemine dayalıdır ve ekserji ile ilgili parametreleri hesaplamak ve tüm akışlar ve bileşenler için maliyet akışlarını görüntülemek için kullanılmaktadır. Gerçek bir vaka çalışması olarak, Türkiye'deki Afyon İSGG gerçek operasyonel verilere dayalı olarak ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, Afyon İSGM tarafından üretilen ısıнын birim ekserji maliyetinin ortalama 5624 \$/saat olarak hesaplandığını göstermektedir. Tüm bileşenler arasında HEX (ısı eşanjörünün)-III, yüksek toplam işletme maliyeti oranı ve maliyet farkı nedeniyle hızla iyileştirilmesi gerektiğini önermişlerdir. Tüm HEX'ler için ekserji birimi başına ısı üretim maliyetleri, sistemin ekserji yok etme maliyetinin yüksek olması nedeniyle azalırken, kuyu başı sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arttığını belirtmişlerdir. SPECO yönteminin, termal bir sistem olarak GMHS'lerde ekserji oranlarına göre maliyet etkinliğini artırmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Topal vd. [45] bölgesel ısıtma sistemlerinde farklı çalışma sıcaklıklarını kullanmanın etkilerini değerlendirmişlerdir. Değerlendirmelerin ölçülebilir olması için, analizlerde ana tedarik aracı olarak bir CHP tesisine sahip özel durum çalışması bölgesel ısıtma ağı olarak dikkate alınmıştır. Alt sistemler ve tüm ısı şebekesi için enerji, ekserji ve ekonomik analizlerin sonuçlarının sunulduğu sistem için üç farklı tasarım senaryosu ele alınmıştır. Termoekonomik analiz ile elektrik ve ısıнын birim ekserji maliyetleri ile alan ısıtma ve kullanım sıcak suyunun birim ekserji maliyetleri belirlenmiştir. Sonuçlarda, çalışma sıcaklıklarının düşürülmesinin, CHP tarafından sağlanan bölgesel ısıtma sisteminin genel enerjik ve ekserji verimliliğini artırırken, alan ısıtma ve kullanım sıcak su kaynağı ile ilişkili ekserji birimi başına maliyeti azalttığını gösterdiğini ifade etmişlerdir.

1.5 JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMLERİ

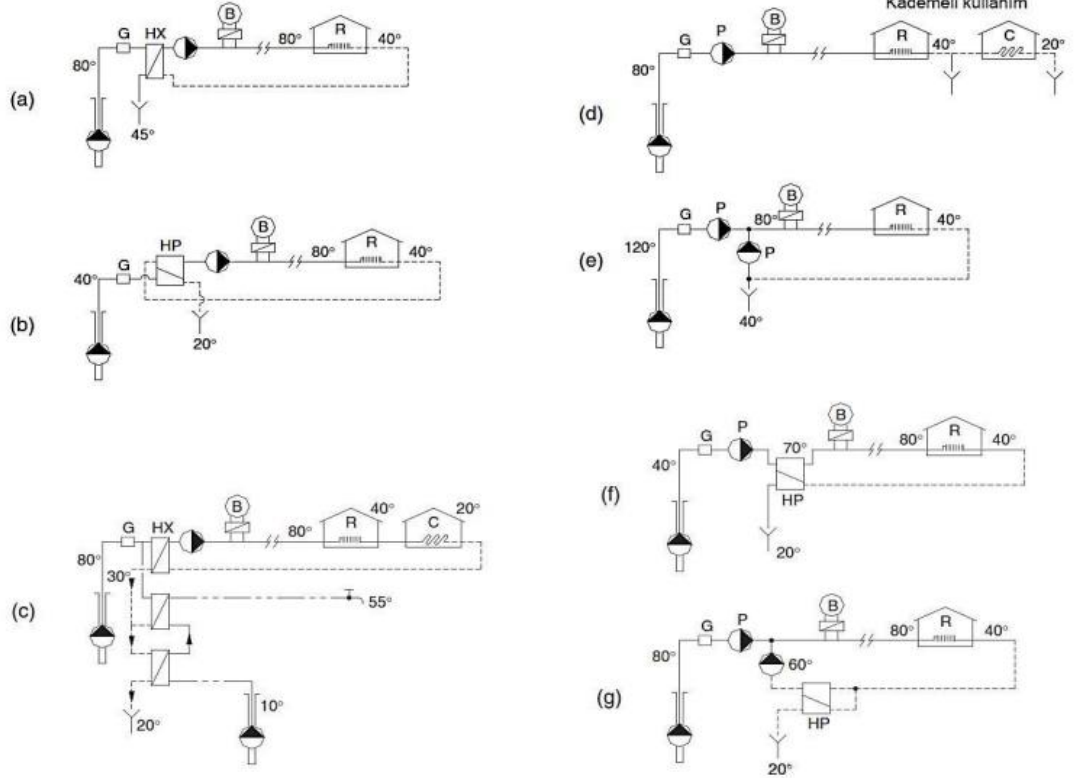
Bölgesel ısıtma kavramı; bir ısı merkezinde yakıt veya jeotermal enerji gibi çeşitli kaynaklar kullanılarak üretilen ısı enerjisinin taşıyıcı bir akışkan ve boru hatları vasıtasıyla kullanım yerine ulaştırılması için kullanılmaktadır. Isının kullanım yerleri bir site, bir mahalle veya bir şehrin tamamı da olabilir. Bölgesel ısıtma konut ısıtması ile birlikte konutların sıcak su ihtiyacını karşılanması, soğutulması ve bölgede bulunan diğer endüstriyel sistemlerin ısı ihtiyacının karşılanmasını da kapsayabilmektedir. Günümüzde, özellikle ülkemizde Jeotermal enerji ile hacim ısıtılması yaygın ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde jeotermal enerjinin elde edildiği jeotermal kuyu sistemleri birincil ısı kaynağı olmaktadır. Jeotermal kaynaktan ısıtmada ekonomik olarak faydalanabilmek için en önemli kriter, kaynak sıcaklığı ve kaynağın debisi yani jeotermal su miktarıdır. Sıcaklığı 30 °C ile 125 °C arasında olan sıcak su kaynakları hacim ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır [46, 47]. Şekil 1-17’de günümüzde kullanılan jeotermal bölgesel ısıtma sistemi çeşitleri şematik olarak verilmiştir. Dolaylı kullanım ve doğrudan kullanım şeklinde başlıca iki sistem uygulanmaktadır.

Dolaylı tip kullanım jeotermal ısıtma sistemi; Bu sistemde jeotermal akışkan ısı değiştiriciler ile sekonder devrede dolaşan sudan ayrılır. Sistemde ısı değiştiricilerin görevi jeotermal kuyulardan elde edilen jeotermal akışkanın sahip olduğu ısıyı binalarda dolaşan sekonder devredeki akışkana iletmektir. Bu sistem jeotermal akışkanın yüksek sıcaklık, basıncı yada kimyasal içeriği gibi durumların olumsuzluk yaratmaması için kullanılmaktadır.

Doğrudan tip kullanım jeotermal ısıtma sistemi; Reykjavik başta olmak üzere bazı şehirlerde elde edilen jeotermal akışkan doğrudan bina ısıtma sistemlerinde kullanılmak üzere sisteme gönderilebilecek kaliteye sahiptir. Bu sistemlerde ısı değiştirici kullanılmaz. Bu sistemlerde aşağıda açıklanan farklı teknik uygulamalar kullanılmaktadır [46, 47]:

Tek boru kullanılan sistem: Genellikle sıcaklığı 100°C’den düşük olan jeotermal akışkanlar için tercih edilen sistemlerdir. Jeotermal akışkan direkt olarak binaların ısıtma sistemindeki radyatörlere gönderilmektedir. Radyatörlerden çıkan jeotermal akışkan atık olarak deşarj edilir.

Çift boru kullanılan sistem: Bu sistemde ise bina ısıtma sisteminin radyatör çıkışındaki suyun bir kısmı tekrar kullanılmak üzere 100-130 °C sıcaklığındaki radyatör giriş hattına geri gönderilir. Bu şekilde ortalama 80 °C sıcaklığında radyatör giriş suyu elde edilmiş olur. Geri kalan dönüş suyu ise reenjekte edilir veya atık olarak deşarj edilir.



Dolaylı kullanım

- a) Jeotermal sıcaklığı $>75^{\circ}\text{C}$
- b) Jeotermal sıcaklığı $30-50^{\circ}\text{C}$
- c) Jeotermal sıcaklığı $>75^{\circ}\text{C}$. Kademeli kullanım.

Doğrudan kullanım

- d) Jeotermal sıcaklığı $<100^{\circ}\text{C}$
- e) Jeotermal sıcaklığı $>100^{\circ}\text{C}$
- f) Jeotermal sıcaklığı $30-50^{\circ}\text{C}$
- g) Jeotermal sıcaklığı $<100^{\circ}\text{C}$

G: Gaz separatörü, P: Pompa, B: Kazan, R: Radyatör ısıtma, C: Fancoil ısıtma, HP: Isı pompası, HX: Isı eşanjörü

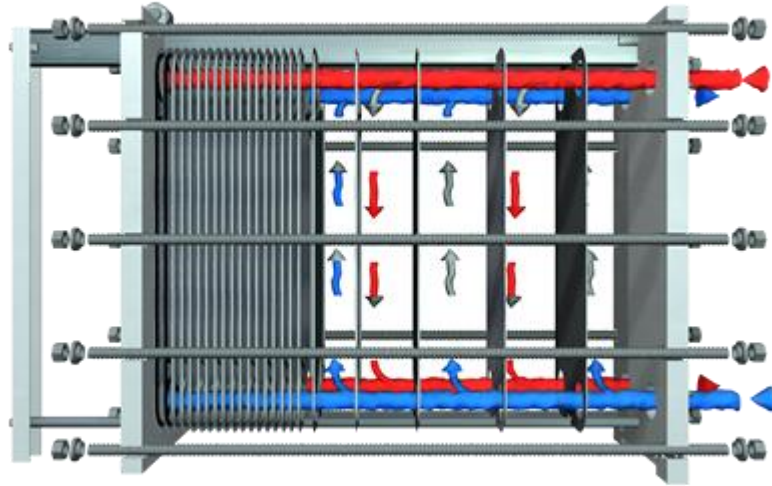
Şekil 1-17: Jeotermal bölgesel ısıtma türleri

1.5.1 Isı Değiştiriciler

Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde yaygın olarak plakalı tip ısı değiştiriciler kullanılmaktadır (Şekil 1-18, 1-19). Plakalı ısı değiştirici kanallı plakalardan oluşur. Belirli sayıda olan plakalar, hareketli ve sabit baskı plakası arasına monte edilerek, üst ve alt taşıyıcı çubuklar arasına dizilir, saplamalar ve cıvatalar ile sıkıştırılır. Elde edilecek basınç kaybı doğrultusunda, istenen verimi sağlayabilmek amaçlı farklı desende olan plakalar, aynı ısı değiştiricide karışık olarak dizilebilir. Özel olarak hazırlanmış farklı desen plakalarının plaka demetine yerleştirilmesiyle, ısı değiştirici de geçiş sayısı arttırılabilir. Böylece akışın birkaç kez yön değiştirmesi sağlanabilir [48].



Şekil 1-18: Plakalı Isı Değiştirici



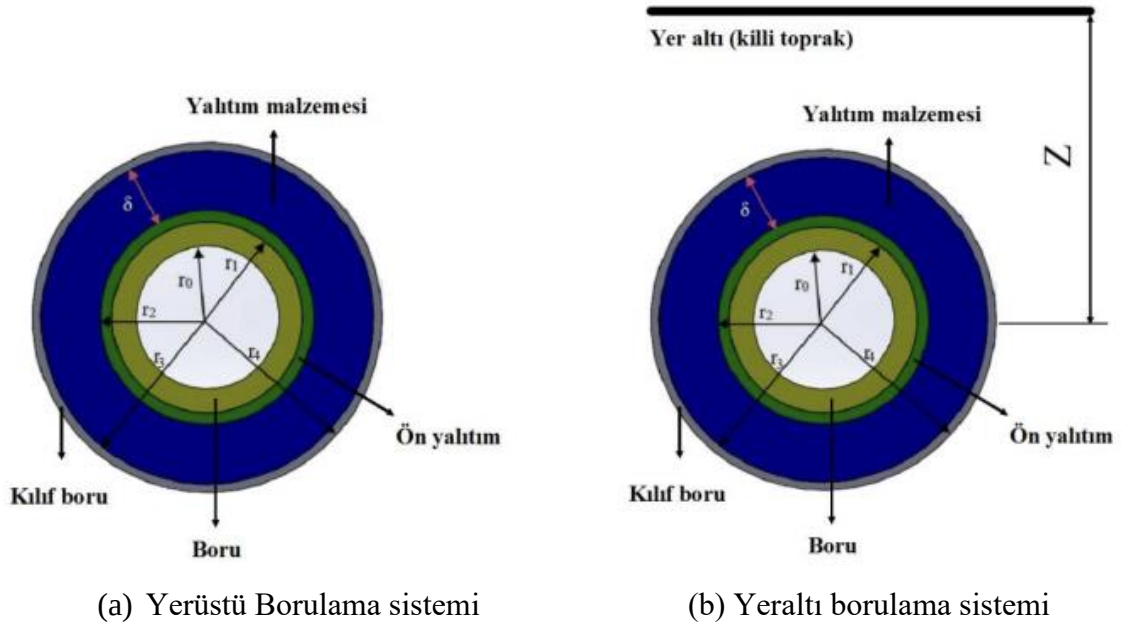
Şekil 1-19: Plakalı ısı değıştirici parçaları

1.5.2 Jeotermal Boru Dağıtım Hatları

Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde cam takviyeli plastik (CTP), Polietilen (PE), asbest çimentolu, çelik, PVC, polipropilen (PP) gibi birçok çeşit boru kullanılmaktadır. Boru hatları, yerüstünden veya yer altına gömülü olarak döşenebilirler (Şekil 1-20, 1-21). Ayrıca borular ısı yalıtımlı veya yalıtımsız (gömülü hatlar için) şekilde olabilir. Boru malzemesi olarak günümüzdeki genellikle çelik ve CTP borular tercih edilmektedir [49].



Şekil 1-20: Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde kullanılan ön izolasyonlu boru tipi



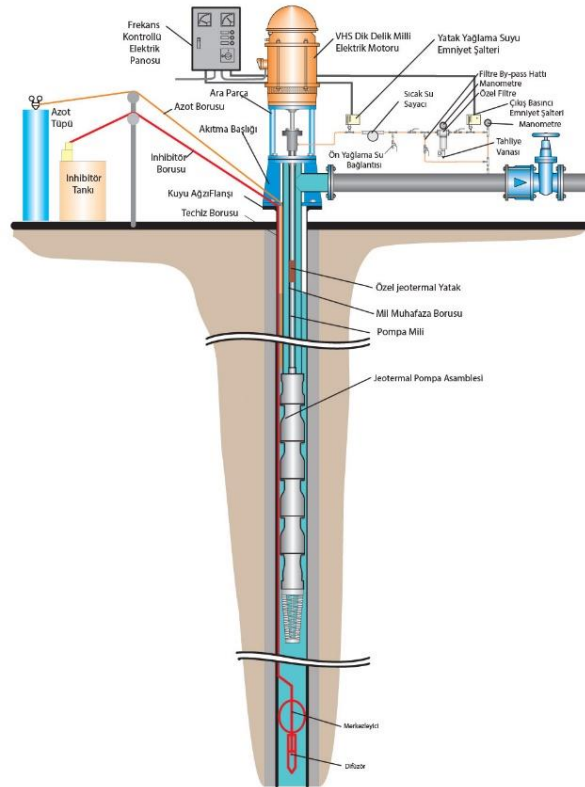
Şekil 1-21: Borulama sistemleri [50]

1.5.3 Jeotermal Akışkanın Pompajı

Jeotermal enerji uygulamalarında akışkanın çıkarılması ve iletilmesinde en yaygın olarak kullanılan pompalar, dik milli derin kuyu pompaları ve dalgıç pompalardır.

Dik milli derin kuyu pompalarında elektrik motoru kuyunun üzerinde bulunur. Pompa ise kolon borularının ucunda bulunmakta ve miller ile çevrilmektedir. Pompa verimleri %65-80 arasındadır. Yüksek sıcaklıklara (200 °C +) dayanır ve genellikle düşük (2200 d/d dan az) devirlidir. Bu tip pompaların montaj ve demontaj zamanı uzundur. Ancak fiyatları genellikle daha düşüktür. Bu tip pompalar düzgün açılmış kuyulara monte edilmelidir. Aksi takdirde aşınma sorunları ortaya çıkabilir. Şekil 1-22’de dik milli derin kuyu pompa görünümü verilmiştir.

Dalgıç pompalar ise pompanın altında bulunan yüksek devirli dalgıç elektrik motoru tarafından tahrik edilirler. Sıcaklığa dayanımı daha azdır ve özel kablolar kullanılması gerekir. Ayrıca su sızıntısını engellemek için sızdırmazlık sistemi kullanılır. Pompa verimleri genellikle %65-80 arasındadır. Eğri kuyularda da rahatlıkla kullanılabilirler [51].



Şekil 1-22: Dik milli derin kuyu pompası görünümü [51]

1.5.4 Jeotermal Enerjinin Çevreye Etkisi

Jeotermal akışkanlar, sahanın ve yüksek oranda rezervuardaki toprak ve kayaların özelliklerine bağlı olarak çeşitli kimyasal özelliklere sahiptir [52].

1.5.4.1 Hava Kirliliği

Jeotermal alanlardan çıkan buhar yoğunlaşmayan 1.0 – 50 g/kg arasında (CO_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 , N_2 ve H_2) gazları içermektedir. Karbondioksit hava kirliliği açısından en önemli bileşendir. Ancak atmosfere salınımı, fosil yakıt ile çalışan elektrik santralleri ile kıyaslandığında çok daha düşüktür. Hidrojen sülfür, jeotermal geliştirmede en büyük endişe kaynağı olan hava kirleticisidir. Emisyonları genellikle 0.5 ile 6.8 g/kWh arasında değişmektedir. H_2S oksitlenerek kükürt dioksit oluşmakta ve daha sonra sülfürik aside dönüşerek asit yağmurlarına neden olmaktadır. Jeotermal santraller nitrojen oksit yaymaz. Fosil yakıt ile çalışan santraller aksine yanma sonucu oluşan bu toksik kimyasalları doğaya salmaktadır. Buhardaki jeotermal gazlar ayrıca amonyak (NH_3), eser miktarda civa (Hg), bor buharı (B) metan (CH_4) gibi hidrokarbonlar ve radon (Rn) içermektedir. Bor, amonyak ve daha az ölçüde civa atmosferden süzülmemektedir.

1.5.4.2 Su Kirliliği

Güç üretimi ve kullanılmış jeotermal akışkanın yönetimi, nehirlerin ve göllerin su kirliliği açısından potansiyel bir tehlike içermektedir. Kaynaktan gelen su ve yoğunlaşma sonucu toksik kimyasalların (arsenik, civa, kurşun, çinko, bor ve kükürt, silika, sülfatlar ve klorürler) yarattığı tehlikeyi bertaraf etmenin en yaygın yöntemi, jeotermal rezervuarın seçilmiş bölümlerine açılan reenjeksiyon kuyularıdır. Reenjeksiyon ayrıca kaynağın ömrünü uzatmak için fayda sağlamaktadır.

1.5.4.3 Toprak Çökmesi

Kayaların ağırlığı kısmen kayanın mineral iskeleti, kısmen de sıvılar (yeraltı suyu, petrol veya jeotermal sıvı) tarafından taşınmaktadır. Sıvılar yeryüzüne çıkartıldıkça kayaları tutan basınçta azalma görülmekte ve çökmeler meydana gelebilmektedir. Daha sert rezervuar kayası ile daha az çökme beklenmektedir.

1.5.4.4 Depremsellik

Jeotermal rezervuarları, özellikle yüksek sıcaklık ve yerkabuğunun jeolojik olarak kararsız bölgelerinde bulunmaktadır. Bu bölgeler volkanik aktivite, derin depremler ve ortalamanın üzerinde ısı akışı ile karakterize edilen bölgelerdir. Rezervuara suyun reenjeksiyon yapılması bir miktar sismik harekette artış sağlama ihtimali olsa da, oluşan sismik hareket düşük yoğunlukta olacağından olumlu bir etkiye sahip olmasını sağlamaktadır.

1.5.4.5 Ses

Yeni açılan veya bakım sırasında kuyuların gürültü seviyesi 90 – 122 dB’dir. Susturucular aracılığı ile 75 – 90 dB seviyelerine düşürülür.

1.5.4.6 Korozyon

Korozyon malzemelerin genel anlamda kimyasal veya elektrokimyasal bozunması olarak tanımlanır. Jeotermal sistemlerde korozyonun önlenmesi için uygulanacak yöntemler seçilirken bölgenin kendine özgü özellikleri belirlenmelidir. Jeotermal akışkanın kimyasal içeriğinin bilinmesi kullanılacak malzemelerin nasıl davranış göstereceğinin belirlenmesi açısından önemlidir. Jeotermal kuyu içerisine yerleştirilen kuyu içi ısı değiştiriciler korozyon ve kabuklaşma sorunlarının önlenmesi için önemli bir paya sahiptir [53].

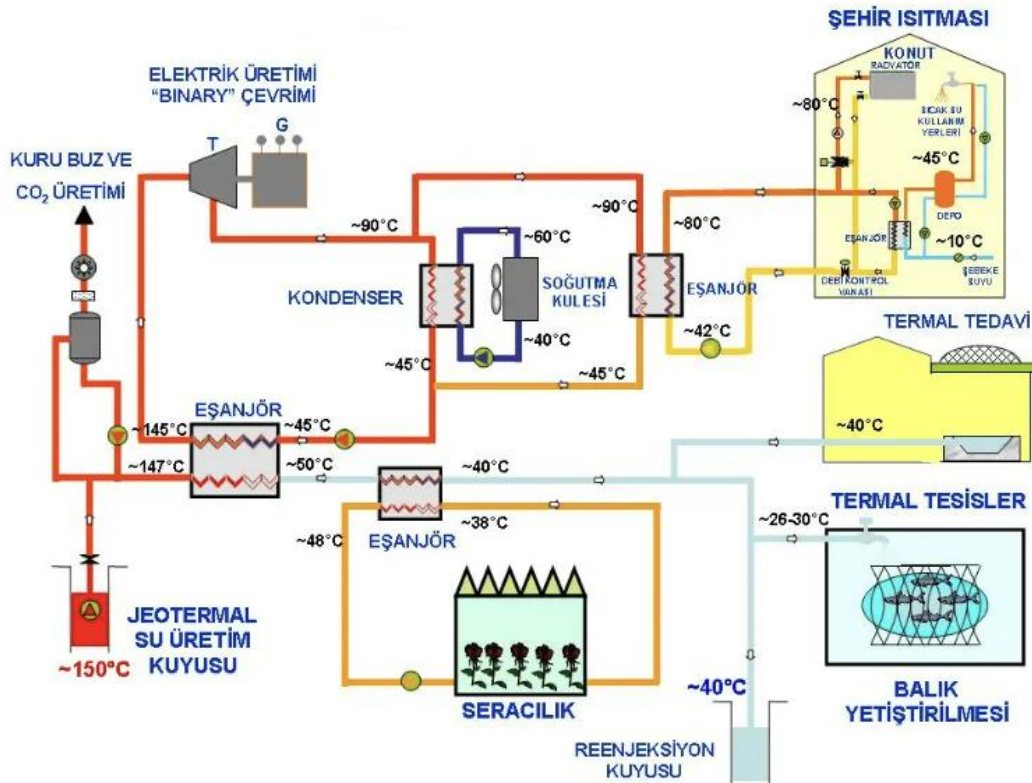
Jeotermal akışkanın içindeki erimiş gazlar korozyona neden olur. Özellikle oksijen karbon çeliklerin hızla homojen dağılımlı korozyona uğramalarına sebep olur. Oksijen oranının 30 ppm’in üstüne çıkması korozyon hızında artışa sebep olur. Ayrıca erimiş karbondioksit pH’ın düşmesine ve karbon çeliğin korozyonunun artmasına sebep olur. Erimiş karbondioksit oranının 50 ppm’in üstünde olması çukurcuk korozyonuna sebep olur [54]. Jeotermal akışkan hatlarında ortaya çıkabilecek korozyon sorununun çözülebilmesi için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir.

- Jeotermal akışkanın kimyasal analizini yaparak korozyona dayanıklı malzeme seçimi yapmak
- Korozyona sebep olabilecek etmenlerin uzaklaştırılması
- Kuyu içi ısı değiştirici kullanılması
- Katodik koruma uygulamak
- Metal olmayan plastik malzeme kullanmak
- İnhibitör uygulanması

1.6 JEOTERMAL ENERJİNİN ENTEGRE KULLANIMI

Jeotermal enerji kullanımı uygulamalarında; jeotermal enerji bir kaynaktan sıcak su şeklinde elde edilir ve enerjisi alındıktan sonra reenjeksiyon veya atık olarak tahliye edilir. Sistemin ekonomik olabilmesi için atık suyun içerisindeki enerjinin mümkün olduğunca alınmış olması gerekir. Bunun için jeotermal sistemlerde yüksek enerji verimi elde etmek amaçlı entegre kullanım uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde uygulama sırasında aynı sistem içinde kademe kademe sıcaklık düşüşü sağlanarak enerjiden en yüksek oranda faydalanmak mümkün olabilir [55]. Şekil 1-23 entegre sistem şemasını göstermektedir.

Türkiye’de Denizli – Sarayköy’de jeotermal akışkan ile elektrik üretimi yapıldıktan sonra ortaya çıkan CO₂ atık gazı değerlendirilerek, sıvı karbondioksit ve kuru buz üretimi yapılmaktadır. Bununla birlikte Jeotermal akışkan ile üretilen elektriğin hidrojen üretimi için elektrolizörde kullanılması ve aynı zamanda jeotermal akışkanın su olarak kullanılmasına İzlanda’da başlanmıştır.



Şekil 1-23: Jeotermal entegre sistem uygulaması

1.7 ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Enerji iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Anerji ve ekserji olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Anerji enerjinin atık kısmı ve ekserji ise enerjinin iş yapan kısmıdır. Ekserji kelimesi Yunanca'da "tersinir anlamına gelen "ex" kelimesi ile "iş" anlamına gelen "ergon" kelimelerinden türetilmiştir [56]. Ekserjinin temeli 1800'lü yıllara dayanmakta olup, J.W. Gibbs tarafından 1878 yılında ortaya çıkmıştır. Ekserji kelime olarak 1953 yılında Z. Rant tarafından ilk olarak kullanılmıştır. Daha sonra ekserji kelimesiyle birlikte, kullanılabilir enerji, kullanılabilir iş ve kullanılabilirlik veya maksimum yararlı iş gibi kavramları ortaya çıkmıştır [42, 56].

Ekserji analizi, enerji dönüştürme veya dağıtım süreçlerinin ve sistemlerinin değerini değerlendirmek için pratik bir yaklaşımdır. Bir enerji analizinin yardımıyla, bir enerji dönüştürme sisteminin performansı verimli ve kesin bir şekilde değerlendirilemez. Ancak bir ekserji analizi, bir enerji analizini tamamlar ve geliştirir. Ekserji analizi, enerji ve diğer sistemleri değerlendirmek ve iyileştirmek için ekserji kavramlarının, dengelerinin ve verimliliklerinin uygulanmasını içerir. Birçok bilim adamı, enerji analizine ek olarak veya onun yerine ekserji analizi kullanılarak süreçlerin veya sistemlerin iyi değerlendirilebileceğini ve iyileştirilebileceğini öne sürmektedir. Ekserji analizinin uygulanması, mevcut tüm termik ve nükleer santrallerde özellikle enerji sistemleri ve teknolojilerinin yanı sıra çevresel bir etkinin değerlendirilmesi için çok çeşitli süreç ve sistemlerin büyük bir bölümünde bize daha faydalı fırsatlar sağlamıştır. Konvansiyonel enerji teknolojileri, özellikle elektrik üretim tesisleri için çok sayıda enerji ve ekserji analizi yapmış ve faydalı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, gelişmiş nükleer enerji teknolojileri için enerji ve ekserji analizlerinin kullanılmasının, optimum tasarım konseptlerine ulaşılmasına yardımcı olabilecek performansa ilişkin anlamlı bilgiler sağlaması beklenebilir. Son olarak, termik ve nükleer santral sistemlerinin analizlerinin açıklanması, ekserjetik yaklaşımla ele alınmaktadır [57].

Ekserji analizinin faydaları, enerji analizine kıyasla çoktur [57].

- Ekserji verimleri her zaman gerçek ideallığe yaklaşımın bir ölçüsüdür ve enerji sistemlerinin performansını değerlendirirken daha anlamlı bilgiler sağlar. Ayrıca, ekserji kayıpları, bir sistemdeki ideallikten sapmaların yerlerini, nedenlerini ve kaynaklarını açıkça tanımlar.
- Ekserji yöntemleri, çoklu ürün içeren karmaşık sistemlerde (örneğin, kojenerasyon ve trijenerasyon tesisleri) ürün enerji formlarının termodinamik değerlerinin değerlendirilmesine yardımcı olabilir.
- Ekserji, enerji tasarrufu ve enerji krizi gibi terimlerin anlaşılmasını geliştirebilir.

- Ekserji yöntemleri optimizasyon faaliyetlerinde yardımcı olabilir.

Enerji ve ekserji kavramları Tablo 1-9’ da karşılaştırılmıştır [58].

Tablo 1-9: Enerji ve ekserji karşılaştırılması

Enerji	Ekserji
Sadece kütle veya enerji akışının özelliklerine bağlıdır. Ortam özelliklerinden bağımsızdır.	Kütle veya enerji akışının özellikleriyle birlikte, ortam özelliklerine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerlere sahiptir.	Ortam ile denge durumunda sıfıra eşitlenir.
Bütün işlemler için termodinamiğin 1. Yasası dikkate alınır.	Sadece tersinir işlemler için Termodinamiğin 1. Yasasını dikkate alır. Tersinmez işlemlerde tamamen veya kısmen ekserji tüketilir.
Tersinir işlemlerde dahil olmak üzere bütün işlemlerde Termodinamiğin 2. Yasası ile sınırlıdır.	Termodinamiğin 2. Yasası nedeniyle tersinir işlemler için sınırlı değildir.
Hareket veya hareket üretme yeteneğidir.	İş veya iş üretme yeteneğidir.
Bir işlem için sürekli olarak korunur. Ne yok olur, ne de üretilir.	Sadece tersinir bir işlemde sürekli olarak korunur. Tersinmez bir işlemde sürekli olarak tüketilir.
Miktarın bir ölçütüdür.	Entropi nedeniyle, hem kalite hem de miktarın bir ölçütüdür.

1.7.1 Termodinamik Bağıntılar

Ekserji belirli bir halde bulunan bir sistemin sahip olduğu enerjinin faydalı iş potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Ekserji kavramı, sistem ile çevrenin halleriyle ilgili bir özelliktir. Çevresiyle dengede olan bir sistemin ekserjisi sıfıra eşittir ve sistemin durumu ölü hal olarak tanımlanır. Bir ısı enerji deposu kullanılarak elde edilen ısıнын ekserjisi, depoyla çevresi arasında çalışmakta olan Carnot ısı makinasından elde edilen iş çıktısına eşittir [59].

Bir sistem ölü halde ise, çevresi ile termodinamik dengede bulunduğu anlamına gelmektedir. Ölü halde bulunan bir sistem, çevresiyle ısı ve mekanik denge de olup, çevre sıcaklığı ve basıncındadır. Sistemin hızı ve bir referansa göre yüksekliği sıfır olup, kinetik ve potansiyel enerjisi yoktur. Ayrıca kimyasal olarak korunduğundan çevresi ile tepkimeye de girmez. Bununla birlikte sistem ile çevre arasında manyetik, yüzeysel ve elektrik gerilme etkileri bulunmamaktadır. Ölü halde bulunan bir sistem için özellikler, örneğin P_0 , T_0 , h_0 , μ_0 , ve s_0 özelliklerindeki gibi sıfır alt indisli ile gösterilmektedir. Aksi belirtilmedikçe, ölü hal için sıcaklık ve basınç değerleri $T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $P_0 = 1\text{ atm}$ (101.325 kPa) olarak kabul edilmektedir.

Çevre, yakın çevre ve uzak çevre arasında ayırım yapılmalıdır. Tanım olarak, çevre, sistem sınırlarının dışındaki her şeydir. Yakın çevre, hal değişiminden etkilenen çevrenin bir kısmına karşılık gelir ve uzak çevre herhangi bir noktadaki özellikleri hal değişiminden etkilenmeyen yakın çevrenin dışındaki bölgeye karşılık gelir. Böylece sistemde, bir hal değişimi sırasında herhangi bir tersinmezlik oluşmaz ve sistemin yakın çevresi ve uzak çevresi herhangi bir tersinmezlikten bağımsızdır.

Bir sistemin, hal değişimi sonunda ölü hale gitmek zorunda olması kavramı, şu şekilde açıklanabilir: eğer son haldeki sistem sıcaklığı, sistemin içinde bulunduğu çevrenin sıcaklığından büyük ya da küçük ise her zaman, bu iki sıcaklık düzeyi arasında bir ısı makinesi çalıştırılarak ek iş üretebiliriz. Eğer son basınç çevresinin basıncından büyük ya da küçük ise, sistem basıncının çevre basıncına genişlemesine izin vererek yine iş elde edebiliriz. Eğer sistemin son hızı sıfır değilse, bu fazla kinetik enerjiyi bir türbin yardımıyla yakalayabiliriz ve onu dönen mil işine veya benzer işlere çevirebiliriz. Başlangıçta ölü halde olan bir sistemden hiçbir iş üretilemez. Bizi saran atmosfer, çok büyük miktarda bir enerji içerir. Bununla beraber, atmosfer ölü haldedir ve içerdiği enerji iş potansiyeline sahip değildir.

Tersinir iş W_{tr} , belirli ilk hal ile son hal arasında bir hal değişimi geçiren sistemde üretilebilecek yararlı işin en fazla miktarı (veya sağlanması gereken en az iş) olarak tanımlanır. Bu ilk hal ile son hal arasındaki tamamen tersinir bir hal değişimi olduğu zaman sağlanan yararlı iş

çıktısıdır (veya girdisidir). Tersinir iş W_{tr} işe yararlı iş W_y arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklanır ve tersinmezlik (I) diye tanımlanır. Tersinmezlik, ekserji yok oluşu ile eşdeğerdir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$I = X_{yok\ olan} = T_0 S_{\text{üretim}} = W_{tr, \text{çıkan}} - W_{y, \text{çıkan}} = W_{y, \text{giren}} - W_{tr, \text{giren}} \quad (1.1)$$

Burada $S_{\text{üretim}}$, hal değişimi sırasındaki entropi üretimidir. Tamamen tersinir bir hal değişimi için, yararlı ve tersinir iş terimleri özdeştir ve böylece ekserji yok oluşu sıfırdır. Ekserji yok oluşu, kayıp iş potansiyelini gösterir ve ayrıca harcanmış iş veya kayıp iş olarak da bilinir.

İkinci yasa verimi, bir düzeneğin etkinliğinin aynı ilk ve son haller arasındaki tersinir hal değişimi sırasındaki etkinliği ile karşılaştırılmasıdır. Ve ısı makinaları ile diğer iş üreten düzenekler için aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{Isul}}{\eta_{Isul, tr}} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (1.2)$$

Soğutma makinaları, ısı pompaları ve diğer iş tüketen düzenekler için ise aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{tr}} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (1.3)$$

Genel olarak ikinci yasa verimi aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Geri kazanılan ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} = 1 - \frac{\text{Ekserji yok oluşu}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (1.4)$$

Sabit (durağan) bir kütlenin (kütle akışı olmayan ekserji) ve bir akışkan akımının ekserjileri aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$\psi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz = (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (1.5)$$

Akış Enerjisi:

$$\Psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (1.6)$$

Hal 1'den hal 2'ye bir hal değişimi geçiren sabit kütleli veya akışkan akımının ekserji değişimi aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) \\ &= (U_2 - U_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \\ &\quad + mg(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (1.8)$$

Ekserji geçişi; ısı, iş ve kütle akışı ile olabilir ve ısı, iş ve kütle geçişi ile beraber olan ekserji geçişi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

Isı ile ekserji geçişi;

$$X_{\text{ısı}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (1.9)$$

İş ile ekserji geçişi;

$$X_{\text{iş}} = \begin{cases} W - W_{\text{çevre}} & (\text{sınır işi için}) \\ W & (\text{işin diğer şekilleri için}) \end{cases} \quad (1.10)$$

Kütle ile ekserji geçişi;

$$X_{\text{kütle}} = m\psi \quad (1.11)$$

Bir hal değişimi sırasında yalıtılmış bir sistemin ekserjisi her zaman azalır veya tersinir bir hal değişiminin sınırlı durumunda sabit kalır. Bu ekserjinin azalması ilkesi olarak bilinir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilir.

$$\Delta X_{yalıtılmış} = (X_2 - X_1)_{yalıtılmış} \leq 0 \quad (1.12)$$

Herhangi bir hal değişimi geçiren herhangi bir sistem için ekserji dengesi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

Genel:

$$X_g - X_{\dot{\varsigma}} - X_{yok olan} = \Delta X_{sistem} \quad (1.13)$$

Genel, birim zaman için:

$$\dot{X}_g - \dot{X}_{\dot{\varsigma}} - \dot{X}_{yok olan} = dX_{sistem}dt \quad (1.14)$$

Genel birim kütle için:

$$X_g - X_{\dot{\varsigma}} - X_{yok olan} = \Delta X_{sistem} \quad (1.15)$$

$$\text{Burada, } \dot{X}_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{yok olan}$$

$$\dot{X}_{iş} = \dot{W}_{yararlı}$$

$$\dot{X}_{kütle} = \dot{m}\psi$$

olarak alınabilir. Tersinir hal değişiminde, ekserji yok oluşu terimi $X_{yok olan}$ yer almaz. Sisteme doğru olan ısı geçişinin yönünü pozitif ve sistemden dışarı doğru olan iş geçişin yönünü pozitif yön olarak alarak, genel ekserji dengesi bağıntıları, daha açık olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] + \sum_g \dot{m}\psi - \sum_{\dot{\varsigma}} \dot{m}\psi - X_{yok olan} = X_2 - X_1 \quad (1.16)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{cv}}{dt}\right) + \sum_g \dot{m}\psi - \sum_{\dot{\varsigma}} \dot{m}\psi - \dot{X}_{yok olan} = \frac{dX_{KH}}{dt} \quad (1.17)$$

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bölgemizde jeotermal enerjinin direkt kullanım alanlarından en yaygın olanı bölgesel ısıtma sistemleridir. Balıkesir İlinde Gönen, Bigadiç, Edremit, Güre ve Sındırgı olarak 5 adet jeotermal bölgesel ısıtma sistemi bulunmaktadır. Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma sistemi 2015 yılında kurulmuş olup, günümüzde toplam 4650 KE ısıtma gerçekleştirilmektedir.

2.1 SINDIRGI İLÇESİNİN TANITIMI

Sındırgı İlçesi, Balıkesir İlinin güneydoğusunda yer alan ve İl merkezine 63 km uzaklıkta bulunan Balıkesir'in ilçelerinden birisidir. Sındırgı ilçesinin Kuzeyinde Balıkesir ilinin Dursunbey ve Bigadiç İlçeleri, Güneyinde Manisa ilinin Demirci, Gördes ve Akhisar İlçeleri, Batısında Manisa ilinin Kırkağaç İlçesi, Doğusunda ise Kütahya ilinin Simav ilçesi bulunmaktadır. Sındırgı ilçesinin büyük bir bölümü dağlık arazilerle ve ormanlarla kaplıdır. Deniz seviyesinden yüksekliği 230 m'dir. Orman ve dağlık arazilerin eteklerinde özellikle Simav Çayı etrafında geniş düzlükler bulunmaktadır. Doğuda Alaçam dağları, Batıda Davullu ve Kazan Dağları, Güneyde Kazan dağlarının yamaçları ve Sidan dağı bulunmaktadır. İlçenin %51'i ormanlık alan, %24'ü tarıma elverişli bölge, %22'si dağlık ve kıraç bölge, %3'ü ise çayır ve tarım arazisinden oluşmaktadır. Ormanlık arazi 71,550 hektardır. Simav Çayı, Cüneyt çayları ve Ilıcalı Sındırgı İlçesinin başlıca akarsularıdır. İlçede Karasal İklim hakimdir. Kışları soğuk ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçmektedir.

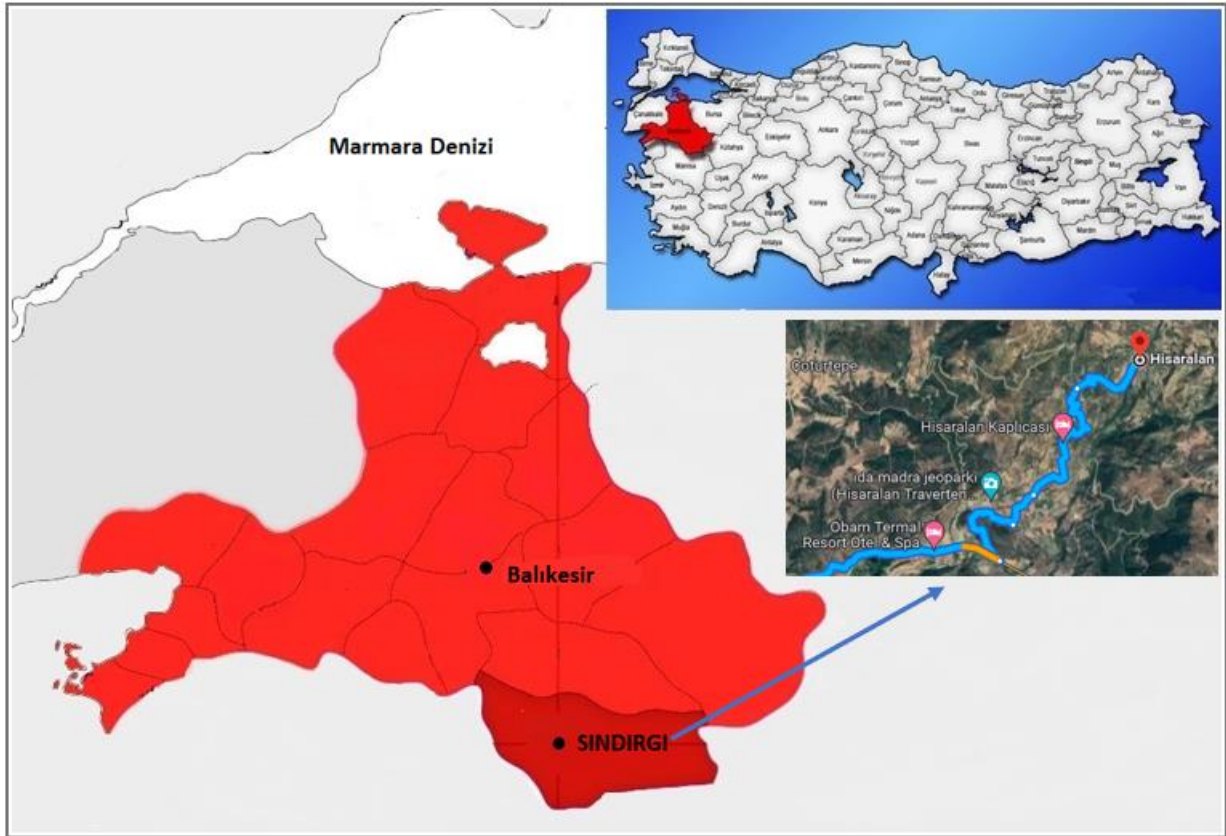
2.2 SINDIRGI JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ

Bu bölümde Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ve özellikleri tanıtılmıştır. Bu kapsamda enerjinin elde edildiği jeotermal saha ve üretim kuyuları, ısı merkezinde bulunan cihazlar ve sistemin çalışma prensibi, sistemin boru hatları ve konut ısıtma, sera ısıtması, balıkçılık ve sebze meyve kurutma gibi enerjinin tüketim yerleri tanıtılmıştır.

2.2.1 Jeotermal Saha ve Kuyular

Sındırgı'ya 13 km uzaklıkta bulunan Hisaralan jeotermal kaynakların bulunduğu saha, Hisaralan Köyü içindedir. Sındırgı ilçesine 20 km, Simav ilçesine ise 72 km karayolu

mesafesindedir. Sındırgı-Hisaralan jeotermal alanında 105 °C sıcaklıkta ve yaklaşık 100 l/s debide jeotermal su bulunmaktadır. Sındırgı sahasında sayısı 50’yi bulan ve dağınık bir şekilde sıcak su kaynakları yeraltından yüzeye çıkış yapmaktadır. Bunun yanında daha düşük debilerde sızıntı şeklinde sıcak su çıkışları da mevcuttur. Sahada sıcak su kaynaklarının etkisiyle oluşan baca şeklindeki travertenler dikkat çeken doğal yapıya sahiptir. Şekil 2-1’de jeotermal saha harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2-1: Sındırgı jeotermal bölgesinin harita üzerinde gösterilmesi

Jeotermal saha içerisinde HS-2 ve HS-3 olmak üzere 2 adet üretim kuyusu bulunmaktadır. Kuyular üzerinde herhangi bir pompa sistemi bulunmamaktadır. Termal suyun yeraltından çıkışı doğal olarak gerçekleşmektedir. Tablo 2-1’de jeotermal kuyuların teknik özellikleri verilmiştir. Aynı zamanda suyun ısı merkezine iletilmesi sırasında da bir pompa sistemine ihtiyaç duyulmadan kot farkı avantajıyla sağlanmaktadır. Bununla birlikte sistemde reenjeksiyon kuyusu bulunmamaktadır.

Tablo 2-1: Jeotermal kuyuların teknik özellikleri

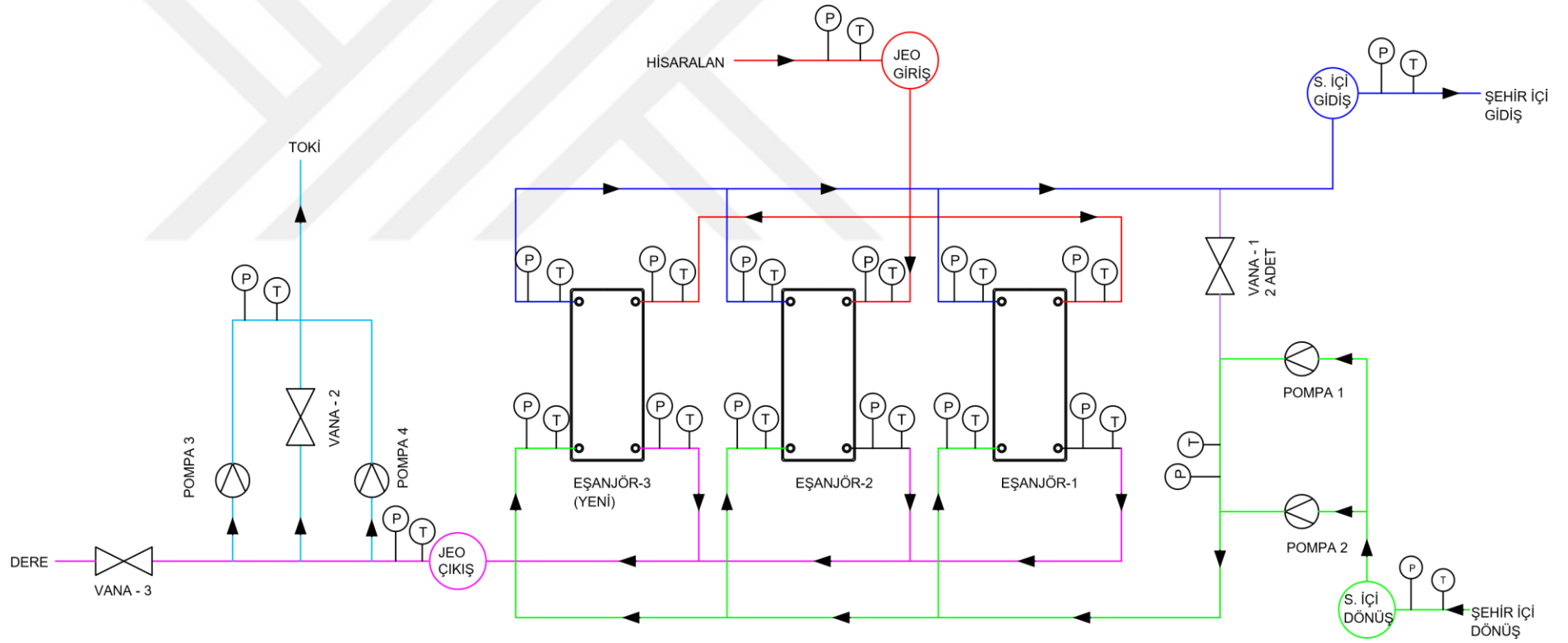
Kuyu No	Sıcaklık (°C)	Debi (kg/s)	İşletme Durumu	Açıldığı Yıl	Derinlik (m)
HS-2	104	13.6	Üretim	1989	650
HS-3	106	7.7	Üretim	2019	930

2.2.2 Isı Merkezi

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi 2015 yılında kurulmuştur. Sistemde günümüz itibariyle 4650 KE ısıtma gerçekleşmektedir. Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi üç farklı devreden oluşmaktadır. Birinci devrede; kuyulardan elde edilen jeotermal su ısı merkezinde bulunan ve üç adet olan plakalı ısı eşanjörlerine gönderilmektedir. Isı eşanjörlerinde jeotermal suyun ısısı, sıcaklığı yaklaşık 65 °C civarında olan sekonder akışkana transfer edilmektedir. Isısı alındıktan sonra jeotermal akışkan 57 °C sıcaklığa kadar düşmekte ve bir kez daha kullanılmak üzere TOKİ konutlarına gönderilmektedir. Burada 82,000 m² kapalı alan ve 668 konut ısıtma sağlanmakta ve daha sonra ısısı alınan jeotermal akışkan ortalama sıcaklığı 30 °C sıcaklığa kadar düşerek deşarj edilmektedir. İkinci kapalı devrede; sekonder akışkan ısı değiştiricileri ile bina sirkülasyon suyuna ısı transfer etmektedir. Sındırgı Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminde ortalama dönüştürme sıcaklıkları bölgesel ısıtma dağıtım ağı için 62/48 °C ve bina devreleri için 58/45 °C'dir. Üçüncü kapalı devreyi ise binalarda bulunan ısıtma sistemleri oluşturmaktadır. Her binada kendi kontrol sistemi mevcuttur. Sistem 15 Ekim-15 Mayıs tarihleri arasında aktif olarak bulunmakla beraber, bu tarihler dışında sistem kontrolü ve bakımı gibi işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için devre dışı kalmaktadır. Şekil 2-2'de jeotermal ısı merkezi akış şeması verilmiştir. Tablo 2-2'de ısı değiştirici özellikleri, Tablo 2-3'te pompaların teknik özellikleri ve Şekil 2-3'te jeotermal ısı merkezi ve eşanjör görünümüleri verilmiştir.

Tablo 2-2: Isı değiştiricilerin özellikleri

Eşanjör No	Beslediği Hat	Marka	Plaka Sayısı	Boyut (cm)
1	Şehir Şebekesi	SONDEX	229	72.7x180
2	Şehir Şebekesi	MIT	205	66.5x150
3	Şehir Şebekesi	MIT	205	66.5x150



Şekil 2-2: Jeotermal ısı merkezi akış şeması

Tablo 2-3: Isı merkezindeki pompaların teknik özellikleri

Pompa No	Bulunduğu Hat	Marka Tip	Debi (m ³ /h)	H _m (mSS)	Güç (kW)	Devir (d/d)
P1	Şehir Şebekesi	MAS DAF NM 150-400	400	50	75	1450
P2	Şehir Şebekesi	MAS DAF NM 150-400	400	50	75	1450
P3	TOKİ	Standart Pompa ve Makine Sanayi SKM 100/6	90	120	55	1450
P4	TOKİ	Standart Pompa ve Makine Sanayi SKM 100/6	90	120	55	1450



Şekil 2-3: Jeotermal ısı merkezinden görünüm

2.2.3 Boru Hatları

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde Hisaralan'da elde edilen jeotermal akışkan 23.7 km uzunluğunda ve 12" çapında özel olarak ısı izolasyonu sağlanmış boru hattı kullanılarak ısı merkezine getirilmekte ve şehrin ısıtılması sağlanmaktadır.

2.2.4 Jeotermal Enerjinin Diğer Kullanım Yerleri

Termal Turizm Alanında Kullanımı

Sındırgı’da termal turizm olarak jeotermal enerjinin kullanımı için bölgede bulunan doğal çıkışlı kaynaklardan faydalanılmaktadır. Otellerde ve diğer tesislerde valilikten alınan kaynak kullanım belgesi kullanılarak, tesis sahipleri termal suyu kendi kurdukları basit sistemlerle kullanım yerine kadar taşımaktadırlar. Bölgede 5 yıldızlı bir otel ve 8 adet pansiyon bulunmaktadır. Jeotermal suyun enerjisi ile bu otellerin ısıtılması ve banyo ve havuzlarda kullanımı sağlanmaktadır. Şekil 2-4’te bölgede bulunan doğal çıkışlı bir kaynak görünümü ve boru sistemi verilmiştir.



Şekil 2-4: Doğal çıkışlı kaynak görünümü

Akuakültür Alanında Kullanım

Hisaralan bölgesinde bulunan doğal kaynaklardan ayrıca akuacıftliklerde süs balığı yetiştirmek amaçlı faydalanılmaktadır. Termal su boru hatları ile balık yetiştirilen havuzların içine taşınarak bu havuzların suyunun ısıtılması sağlanmaktadır. Tesislerde balıklar için ihtiyaç duyulan ideal su sıcaklığı jeotermal kaynak kullanılarak suni olarak elde edilmektedir. Balık havuzlarında su sıcaklığı sabit olarak tutularak (24-26°C), çevre şartlarından etkilenmeden akvaryum balıkları sürekli olarak tüm yıl boyunca yetiştirilmektedir. Bölgede jeotermal enerjiden faydalanılarak tesislerde akvaryum süs balığı yetiştirme işlemlerine 2007 yılında başlanılmıştır. İşlemler yaklaşık olarak 1500 m² boyutlarında 30x12 metre ebatlarında dört adet cam sera içinde bulunan havuzlarda yapılmaktadır. Tesislerin sera şeklinde dizayn edilmesinin sebebi akvaryum balıklarının yüksek veya düşük sıcaklıktan, yetersiz veya fazla ışıktan, kar, yağmur veya rüzgar gibi iklimsel olayların

etkilerinden korumak içindir. Ayrıca bölgede açık alanlarda da balık yetiştirilmektedir. Kapalı ve açık tüm alanlarda toplam 340 adet havuz bulunmaktadır. Seralarda akuakültür faaliyetlerinde 150 adet plastik (1x1 m), 30 adet ahşap (1x3.5 m), 60 adet beton (3x2 m), 30 adet (1x3.5 m) havuz kullanılmaktadır. Şekil 2-5'te balık çiftliğinden görünüm verilmiştir.



Şekil 2-5: Balık çiftliğinden görünüm

Seracılıkta Kullanım

Sındırgı jeotermal bölgesinde sera sistemlerinin ısıtılmasında yine doğal çıkışlı kaynaklardan yararlanılmaktadır. Seralarda domates, biber ve salatalık gibi ürünler yetiştirilmektedir. Şekil 2-6'da doğal çıkışlı kaynakların kullanıldığı bir pansiyon ve sera yan yana görülmektedir.



Şekil 2-6: Pansiyon ve seralardan bir görünüm

Jeotermal Enerji ile Sebze ve Meyve Kurutma

Jeotermal enerjinin doğrudan kullanım uygulamalarından biride ürün kurutma işlemidir. Mevsimlere bağlı kalmadan devamlı jeotermal enerji kaynağı kurutma işlemlerinde kullanılabilme olanağı sağlamaktadır. Düşük sıcaklıkta bulunan jeotermal akışkanların tarım ürünlerinin kurutulması amaçlı kullanılması çok uygundur. Sındırgı jeotermal bölgesinde 3-4 l/s debide ve 105 °C sıcaklıktaki termal su kurutma tesisinde kullanılmaktadır. Şekil 2-7’de jeotermal akışkan ile meyve ve sebze kurutma tesisinden görünüm verilmektedir.



Şekil 2-7: Jeotermal enerji ile sebze meyve kurutma

2.3 ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YAPILAN ÖLÇÜMLER

Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde verimliliğin tespit edilebilmesi amaçlı yapılan hesaplamaların sonuçlarının doğruluğu sistem verilerinin gerçek ve güncel olarak elde edilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin gerçek verileri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için sıcaklık, basınç, pompa değerleri gibi verilerek sistem üzerinde bulunan ölçme cihazları üzerinden okunarak ve debi değerleri ise ultrasonik debimetre kullanılarak ölçülerek elde edilmiştir. Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde yapılan ölçümlerle sistemin verimliliğinin belirlenmesi ve sistemde oluşan kayıpların hesaplanması amaçlanmıştır. Ölçümlerin doğruluğunu kanıtlamak üzere ölçüm standartlarına göre cihazlardan en yüksek doğruluk sağlanılmaya çalışılmıştır. Tablo 2-4 ölçümlerde kullanılan debi cihazının teknik özelliklerini vermektedir.

Tablo 2-4: Ölçümlerde kullanılan cihazların teknik özellikleri ve kullanım yerleri

Ölçüm Ekipmanı	Teknik Özellikleri	Kullanım Yerleri
PAKKENS Sıcaklık İndikatörü	Ölçüm Aralığı: 0 °C ile 120 °C aralığında	Isı merkezindeki ölçüm noktalarının ve kuyu başı sıcaklık değerlerinin ölçümü
PAKKENS Basınç İndikatörü	Ölçüm Aralığı: 0 bar ile 25 bar aralığında	Isı merkezindeki ölçüm noktalarının ve kuyu başı basınçlarının ölçümü
HONEYWELL Ultrasonik Debimetre	DN 50-DN 400 ölçüm aralığında 40 °C ile +120 °C operasyon sıcaklığında Ölçüm noktasından önce min.10xDN ve ölçüm noktasından sonra min.5xDN düz uzunluk olma şartı LCD ekran ile anlık ve toplam akışları görme Çıkış 4-20 mA akım Ölçüm hassasiyeti ölçülen değerin %±1'i	Isı merkezindeki kuyulardan gelen toplam termal akışkanın debisinin sürekli olarak ölçümü ve veri toplama sistemi ile kaydedilmesi

2.3.1 Debi Ölçüm Çalışmaları

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi üzerinde debi ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmalar çok tekrarlı gerçekleştirilmiş ve yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplamalarda kullanılan debi değerleri elde edilmiştir. Ölçüm aletlerinin periyodik kalibrasyonları kontrol edilerek doğru ve güncel değerlere ulaşılmıştır. Hisaralan’da toplam 2 adet kuyu (HS2 ve HS3) bulunmaktadır. Kuyu çıkışında ultrasonik debimetre ile ölçüm yapılmaya çalışılmış fakat sonuç elde edilememiştir. 100 °C’nin üzerinde termal su sıcaklığı söz konusu olduğu için su ile beraber gazda çıkmakta ve boru içerisinde oluşan sıvı-gaz karışımı debimetre ile debi ölçümü gerçekleşmesine izin vermemektedir. İki kuyu hattı birleştikten sonra gaz seperatör ile ısı merkezine gönderilmektedir. Isı merkezinde hat içerisinde gaz bulunmadığı için, kuyular ayrı ayrı çalıştırılarak ısı merkezinden kuyu debi ölçümleri ve diğer noktalardan debi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2-8 debi ölçümü ile ilgili görüntülerini vermektedir.



Şekil 2-8: Debi ölçümü görünümü

2.4 SINDIRGI JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

2.4.1 Kütle Dengesi, Enerji ve Ekserji Analizi Bağlılıkları

Bu tez kapsamında kütle, enerji ve ekserji dengesi denklemleri sistemin kararlı durum ve akış sergilediği kabul edilerek değerlendirilmiştir. Termodinamik özellikler termodinamik tablolar kullanılarak elde edilmiştir [59].

Kütle dengesi şu şekilde yazılabilir.

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (2.1)$$

Jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin kütle dengesi ise şu şekilde yazılabilir.

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} - \dot{m}_{dışarı} = 0 \quad (2.2)$$

Genel enerji denge eşitliği şu şekilde yazılabilir.

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{çıkan} \quad (2.3)$$

Enerji denge eşitliği ise daha açık olarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak ifade edilebilir.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{giren} h_{giren} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{çıkan} h_{çıkan} \quad (2.4)$$

Burada;

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{net,giren} = \dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{çıkan} \quad \text{ısı giriş akımı,}$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{net,giren} = \dot{W}_{giren} - \dot{W}_{çıkan} \quad \text{net iş akımı (güç)}$$

h birim kütle için entalpidir.

Kinetik enerji, potansiyel enerji ve küçük ısı-iş transferi gibi değişiklikleri ihmal edilerek, (2.4) ile verilen enerji denge denklemi aşağıdaki şekilde basit olarak yazılabilir.

$$\sum \dot{m}_{giren} h_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} h_{çıkan} \quad (2.5)$$

n sayıdaki jeotermal kuyu için, jeotermal akışkanın enerji değeri, aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$\dot{E}_{jeo} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} (h_{jeo,i} - h_0) \quad (2.6)$$

Ekserji, herhangi gerçek bir proseste tüketilmekte veya tahrip olmaktadır. Proses boyunca ekserji tüketimi tersinmezlikler sebebiyle yaratılan entropi ile orantılı olarak değişmektedir.

Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde genellikle, proses ağırlığını fiziksel ekserji oluşturmaktadır.

Birim zaman için genel ekserji denge eşitliği, ekserji akımları olarak,

$$\dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{çıkan} = \dot{E}x_{kayıp} \quad (2.7)$$

ifade edilebilir. Burada, akışın özgül ekserjisi ise aşağıdaki denklemdeki gibi verilmektedir.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.8)$$

Jeotermal akışkanın ekserji değerinin belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$\dot{E}x_{jeo} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} [(h_{jeo,i} - h_0) - T_0(s_{jeo,i} - s_0)] \quad (2.9)$$

2.4.2 Ekserji Kayıpları

Bütün sistemin ve sistemde bulunan ısı değiştirici, pompa, boru hatları gibi elemanların ekserji kayıpları aşağıdaki denklemlerden bulunabilir.

$$\dot{E}x_{kayıp,E\dot{S}} = \dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{çıkan} \quad (2.10)$$

$$\dot{E}x_{kayıp,Pompa} = \dot{W}_{pompa} - (\dot{E}x_{çıkan} - \dot{E}x_{giren}) \quad (2.11)$$

$$\dot{E}x_{kayıp,Sis} = \sum \dot{E}x_{kayıp,E\dot{S}} + \sum \dot{E}x_{kayıp,Boru} + \sum \dot{E}x_{kayıp,Pompa} \quad (2.12)$$

2.4.3 Enerji ve Ekserji Verimliliği

Sistemin enerji verimi aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir.

$$\eta_{sis} = \frac{\dot{E}_{yararlı}}{\dot{E}_{jeo}} \quad (2.13)$$

Eşanjörlerin ekserji verimliliği aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{E\dot{S}} = \frac{\dot{m}_{soğuk}(\psi_{soğuk,çıkan} - \psi_{soğuk,giren})}{\dot{m}_{sıcak}(\psi_{sıcak,giren} - \psi_{sıcak,çıkan})} \quad (2.14)$$

Sistemin ekserji verimliliği aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir.

$$\varepsilon_{sis} = \frac{\dot{E}x_{kullanışlı,E\dot{S}}}{\dot{E}x_{jeo}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{kayıp,Sis} + \dot{E}x_{dışarı}}{\dot{E}x_{jeo}} \quad (2.15)$$

2.4.4 Jeotermal Kaynakların Ekserji Analizine Göre Sınıflandırılması

Jeotermal kaynaklar çeşitli şekillerde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma kaynakların daha verimli ve etkin kullanılması açısından oldukça önemlidir. Genel olarak jeotermal kaynaklar

rezervuar sıcaklıkları baz alınarak sınıflandırılmaktadırlar. 90°C'den az sıcaklıktaki kaynaklar "düşük kaliteli kaynak", 90-150°C arasında "orta kaliteli kaynak" ve 150°C'den büyük sıcaklığa sahip jeotermal kaynaklar "yüksek kaliteli kaynak" olarak ifade edilmektedir. Jeotermal kaynaklar ısı formuna bulunmaktadır. Halbuki iş, termodinamik açıdan değerlendirildiğinde ısıdan daha kullanışlıdır. Bunun sebebi tüm ısı kaynakları işe dönüştürülemeyecek olmasıdır. Bu sebeple jeotermal kaynakların termodinamik iş yapabilme yetenekleri dikkate alınarak sınıflandırılması en doğru yaklaşımdır. Jeotermal kaynakların sınıflandırılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için Lee tarafından aşağıdaki bulunan eşitlikte özgül ekserji indeksi (SE_{xI}) bağıntısı geliştirilmiştir [60].

$$SE_{xI} = \frac{h_{jeo} - 273.16s_{jeo}}{1192} \quad (2.16)$$

$SE_{xI} < 0.05$ ise	"düşük kaliteli jeotermal kaynak"
$0.05 \leq SE_{xI} < 0.5$ ise	"orta kaliteli jeotermal kaynak"
$SE_{xI} \geq 0.5$ ise	"yüksek kaliteli jeotermal kaynak"

şeklinde sınıflandırılır. Eşitlikte jeotermal alanın ortalama entalpi ve entropi değerleri bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler de aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Ortalama entalpi,

$$h_{jeo} = \frac{\sum_{i=1}^{n=2} \dot{m}_i h_i}{\sum_{i=1}^{n=2} \dot{m}_i}$$

Ortalama entropi,

$$s_{jeo} = \frac{\sum_{i=1}^{n=2} \dot{m}_i s_i}{\sum_{i=1}^{n=2} \dot{m}_i}$$

3. BULGULAR

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde saha da bulunan cihazlardan okunarak veya ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak enerji ve ekserji verimleri belirlenmiş ve enerji ve ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Jeotermal akışkan ve sistemde sekonder devrede dolaşan temiz sıcak su için tüm sistemden elde edilen sıcaklık, basınç ve debi değerleri elde edilmiştir. Jeotermal bölge ısıtma sistemi için enerji-ekserji oranları ve enerji-ekserji değerleri termodinamik tablolar yardımıyla hesaplanmıştır.

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde şehrin ısıtılmasından sonra eşanjörden çıkan termal su bir kez daha değerlendirilmek üzere TOKİ konutlarını ısıtmak üzere verilmektedir. Dolayısıyla termal suyun enerjisinden bir kez daha faydalanılması enerji ve ekserji verimini artırıcı bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin bir başka özelliği kuyulardan termal suyun pompa sistemine ihtiyaç duymadan artezyen şeklinde elde edilmesidir. Ayrıca suyun ısı merkezine iletilmesi sırasında da pompa sistemine ihtiyaç bulunmamaktadır. Kuyular ile ısı merkezi arasındaki kot farkı suyun kendi cazibesi ile iletilmesini sağlamaktadır. Ancak kuyular ile ısı merkezi arasında kot farkının avantajı olduğu gibi, elektrik maliyetlerini çok arttıracığı için reenjeksiyon yapılamaması gibi bir dezavantajı da bulunmaktadır. Tüm kullanımlar sonrası atık termal su dereye verilmektedir. Sistemin bu özellikleri İl sınırları içindeki diğer sistemlerden farklı olarak ortaya çıkmaktadır. Tablo 3-1 enerji ve ekserji analizinin yapıldığı durum ve özelliklerini vermektedir. Tablo 3-2 ve 3-3 kış ve bahar dönemleri için akışkan özelliklerini ve enerji- ekserji oranlarını vermektedir.

Tablo 3-1: Enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı durum ve özellikleri

DÖNEM	Dış Hava Sıc. (°C)	Kuyular	Isı Değiştiriciler	Sirkülasyon Pompaları
KIŞ	0.1	HS2, HS3	E1, E2, E3	P1, P2, P3
BAHAR	10	HS2, HS3	E1, E2, E3	P1, P2, P3

Tablo 3-2: Enerji- Ekserji Oranları (Kış Dönemi)

No		Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Spesifik entalpi h (kJ/kg)	Spesifik entropi s (kJ/kgK)	Debi $\dot{m}$ (kg/s)	Spesifik ekserji ψ (kJ/kg)	Ekserji oranı $\dot{E}_x$ (kW)	Enerji oranı $\dot{E}$ (kW)
0	ÖH	0.1	101.325	0.4824	0.0013	-	-	-	-
HS2	TS	104	0.5	435.92	1.3517	13.6	66.778	908.928	5926.790
HS3	TS	106	0.5	444.20	1.3741	7.7	68.943	536.224	3451.137
E1 TG	TS	93	5.5	387.74	1.2270	5.9	52.641	312.762	2300.836
E1 TÇ	TS	57	5.3	238.59	0.7932	5.8	21.918	127.860	1388.961
E1 ŞÇ	S	62	5	259.59	0.8559	15.2	25.801	394.194	3958.588
E1 ŞG	S	48	6.8	200.97	0.6777	15.2	15.830	241.853	3063.005
E2 TG	TS	93	5.4	387.74	1.2270	5.9	52.641	312.762	2300.836
E2 TÇ	TS	57	5.2	238.59	0.7932	5.8	21.918	127.860	1388.961
E2 ŞÇ	S	62	5	259.58	0.8559	15.2	25.791	394.041	3958.436
E2 ŞG	S	48	6.8	200.97	0.6777	15.2	15.830	241.853	3063.005
E3 TG	TS	93	5.5	387.74	1.2270	9.7	52.641	513.823	3779.945
E3 TÇ	TS	57	5.3	238.59	0.7932	9.7	21.918	213.100	2314.935
E3 ŞÇ	S	61.5	5	257.41	0.8497	30.5	25.314	773.495	7850.566
E3 ŞG	S	50	6.8	209.40	0.7034	30.5	17.244	526.909	6383.593
TOKİ	TS	57	7	238.59	0.7932	6.9	21.918	152.214	1653.525
P1	S	48	6.8	200.97	0.6777	30.8	15.830	488.104	6181.701
P1'	S	47.5	1.5	198.89	0.6712	30.8	15.524	478.684	6117.568
P2	S	48	6.8	200.97	0.6777	30.8	15.830	488.104	6181.701
P2'	S	47.5	1.5	198.89	0.6712	30.8	15.524	478.684	6117.568
P3	S	57	7	238.59	0.7932	6.9	21.918	152.214	1653.525
P3'	S	56.5	5.2	236.50	0.7868	6.9	21.576	149.834	1639.011
Deşarj	TS	30	0.5	125.79	0.4369	14.4	6.388	92.282	1809.999
Deşarj (Toki)	TS	30	0.5	125.79	0.4369	6.9	6.388	44.363	870.191

ÖH: Ölü hal

TS: Termal su

S: Su

Tablo 3-3: Enerji- Ekserji Oranları (Bahar dönemi)

No		Sıcaklık T (°C)	Basınç P (kPa)	Spesifik entalpi h (kJ/kg)	Spesifik entropi s (kJ/kgK)	Debi $\dot{m}$ (kg/s)	Spesifik ekserji ψ (kJ/kg)	Ekserji oranı $\dot{E}_x$ (kW)	Enerji oranı $\dot{E}$ (kW)
0	ÖH	10	101.325	42.01	0.1510	-	-	-	-
HS2	TS	104	0.5	435.92	1.3517	13.6	54.112	736.523	5361.553
HS3	TS	106	0.5	444.20	1.3741	7.7	56.053	435.965	3128.144
E1 TG	TS	99	6.5	414.82	1.2950	6.7	49.058	333.110	2813.403
E1 TÇ	TS	72	6.3	301.36	0.9789	5.8	25.054	146.150	1755.119
E1 ŞÇ	S	76	5.7	318.12	1.0274	15.2	28.088	429.134	4852.835
E1 ŞĞ	S	63	7.1	263.68	0.8665	15.2	19.184	293.081	4021.074
E2 TG	TS	99	6.3	414.82	1.2950	6.7	49.058	333.110	2813.403
E2 TÇ	TS	72	6.1	301.36	0.9789	5.8	25.054	146.150	1755.119
E2 ŞÇ	S	76	5.5	318.12	1.0274	15.2	28.088	429.134	4852.835
E2 ŞĞ	S	63	7	263.68	0.8665	15.2	19.183	293.081	4021.074
E3 TG	TS	99	6.5	414.82	1.2950	12.4	49.058	610.701	5157.906
E3 TÇ	TS	72	6.3	301.36	0.9789	9.7	25.054	243.584	2925.199
E3 ŞÇ	S	73	5.3	305.55	0.9911	30.5	25.792	788.080	9321.510
E3 ŞĞ	S	62	7	259.58	0.8559	30.5	18.083	552.545	7916.871
TOKİ	TS	55	6	230.23	0.7679	6.9	13.637	94.733	1595.478
P1	S	63	7.1	263.68	0.8665	30.8	19.184	591.491	8115.259
P1'	S	62.5	2.1	261.59	0.8623	30.8	18.282	563.698	8050.818
P2	S	63	7.1	263.68	0.8665	30.8	19.184	591.491	8115.259
P2'	S	62.5	2.1	261.59	0.8623	30.8	18.282	563.698	8050.818
P3	S	72	7	301.36	0.9789	6.9	25.054	173.988	2089.428
P3'	S	71.5	5.2	299.35	0.9730	6.9	24.714	171.625	2075.469
Deşarj	TS	38	0.5	159.15	0.5430	14.4	6.204	89.6133	2291.865
Deşarj (Toki)	TS	40	0.5	167.57	0.5725	6.9	6.275	43.579	1160.330

ÖH: Ölü hal

TS: Termal su

S: Su

Tablo 3-4’te sisteme giren enerji, kullanılan enerji, enerji kayıpları ve enerji verim değerleri verilmiştir. Tablo 3-5’te ise sisteme giren ekserji, kullanılan ekserji, ekserji kayıpları ve ekserji verim değerleri verilmiştir. Sistemde kullanılan enerji ve ekserji konut ısıtma ve TOKİ tüketiminin toplamı şeklindedir. Deşarj kayıpları ve boru hatlarındaki kayıplar iki farklı şekilde enerji kayıpları olarak ortaya çıkmaktadır. Deşarj kayıpları, pompa kayıpları, boru hatlarındaki kayıplar ve eşanjörlerdeki kayıplar ise dört farklı şekilde ekserji kayıpları olarak ortaya çıkmaktadır. Tablo 3-4 ve Tablo 3-5’te kış ve bahar dönemleri karşılaştırıldığında giren enerji ve ekserji miktarlarının kış döneminde daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca dış hava sıcaklığında artış enerji ve ekserji verimlerinde de artışa sebep olmaktadır.

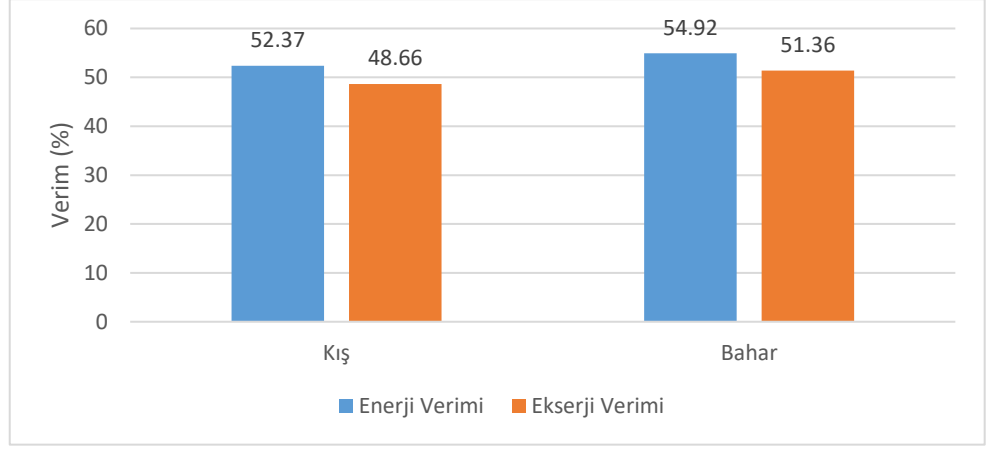
Tablo 3-4: Kış ve bahar dönemleri için enerji analizi sonuçları

Durum No	Kullanılan (kW)			Kayıplar (kW)		
	Giren (kW)	Isıtma	TOKİ	Deşarj (Isı merkezi +Toki)	Boru	Verim (%)
Kış	9375	3257	1653	2679	1786	52
Bahar	8488	3068	1595	3271	554	55

Tablo 3-5: Kış ve bahar dönemleri için ekserji analizi sonuçları

Durum No	Kullanılan (kW)			Kayıplar (kW)				Verim (%)
	Giren (kW)	Isıtma	TOKİ	Deşarj (Isı merkezi +Toki)	Boru	Pompa	Eşanjör	
Kış	1443	551	152	136	320	21	263	49
Bahar	1168	507	95	105	9	57	395	51

Şekil 3-1 kış dönemi (1) ve yaz dönemi (2) olmak üzere enerji verimi (I. kanun) ve ekserji verimi (II. kanun) değerlerini şekil olarak göstermektedir. Her iki dönemde de enerji verimlerinin ekserji verimlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3-1: Kış ve Bahar döneminde enerji ve ekserji verimleri

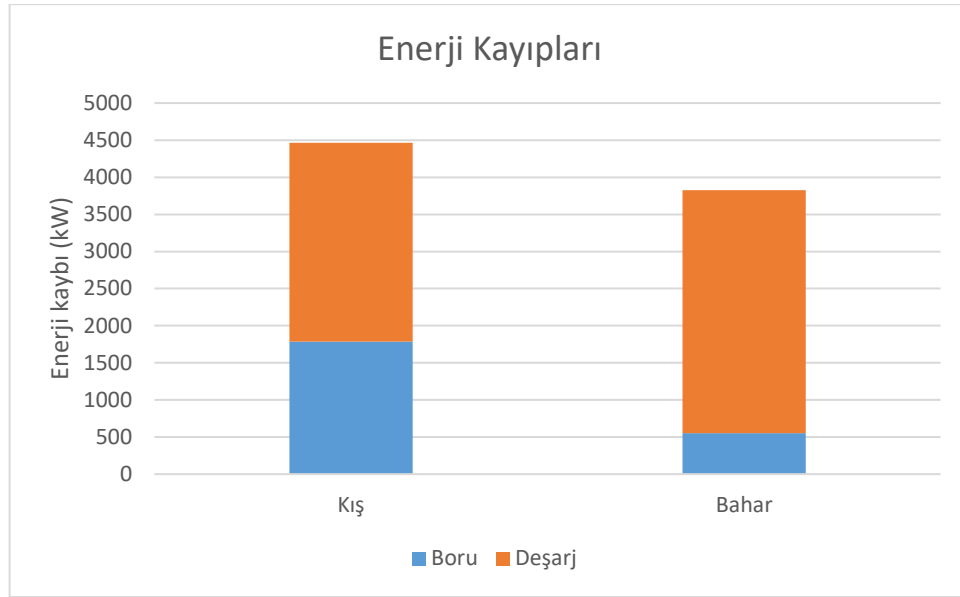
Tablo 3-6’da jeotermal sistem için hesaplanan yıllık ortalama enerji ve yıllık ortalama ekserji verim değerleri verilmiştir. Her iki dönem için ortalamalar alınarak dönemlik değerler ve her bir dönemin bir yıldaki gün sayısının yüzdesi dikkate alınarak yıllık ortalama değerler hesaplanmıştır.

Tablo 3-6: Yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri

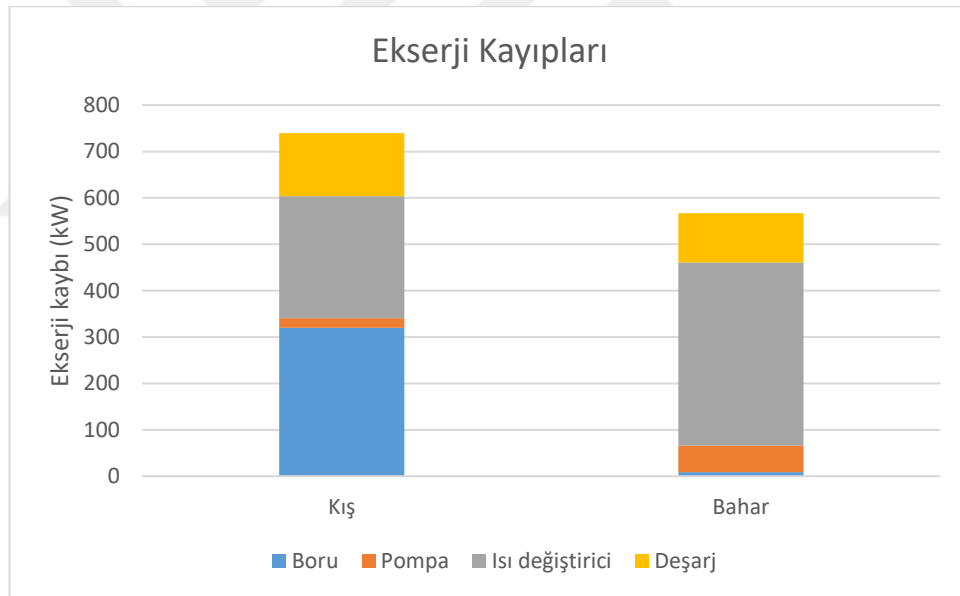
	Kış	Bahar	Yıllık Ortalama
Gün sayısı	90	120	210
Ort. enerji verimi (%)	52	55	54
Ort. ekserji verimi (%)	49	51	50

Her iki durum için meydana gelen enerji kayıpları Şekil 3-2’de, ekserji kayıplarını ise Şekil 3-3’te grafik olarak gösterilmiştir. Kış döneminde boru kayıpları ve deşarj kayıpları arasındaki fark daha az olmak üzere bahar döneminde değerler birbirine yakındır.

Sistemden elde edilen veriler ve (2.16) denklem kullanılarak Sırdığı jeotermal kaynakların özgül ekserji indeksi 0.056607 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Sırdığı jeotermal kaynaklarının "**Orta Kaliteli Jeotermal Kaynak**" sınıfına girdiğini göstermektedir.

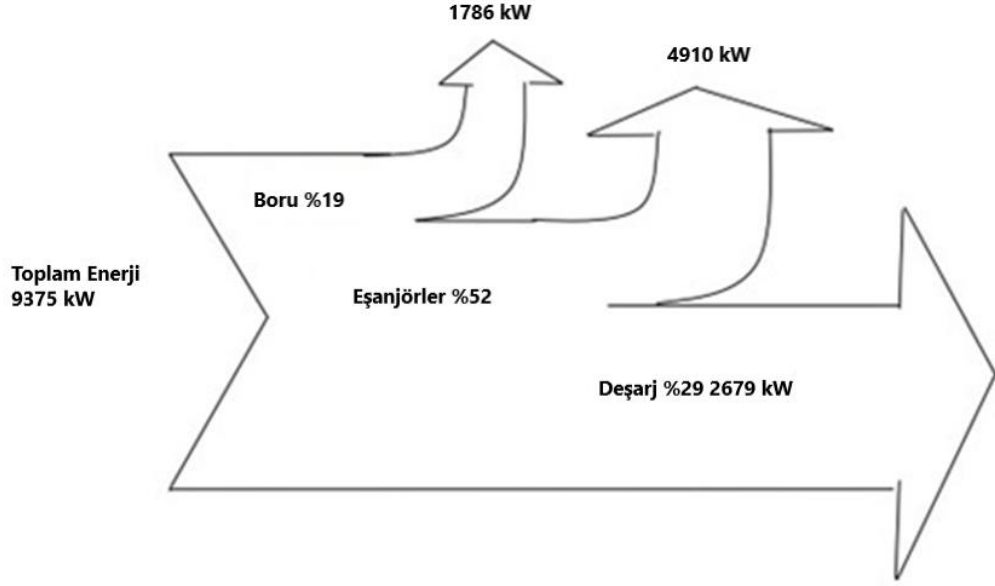


Şekil 3-2: Kış ve Bahar döneminde ortaya çıkan enerji kayıpları

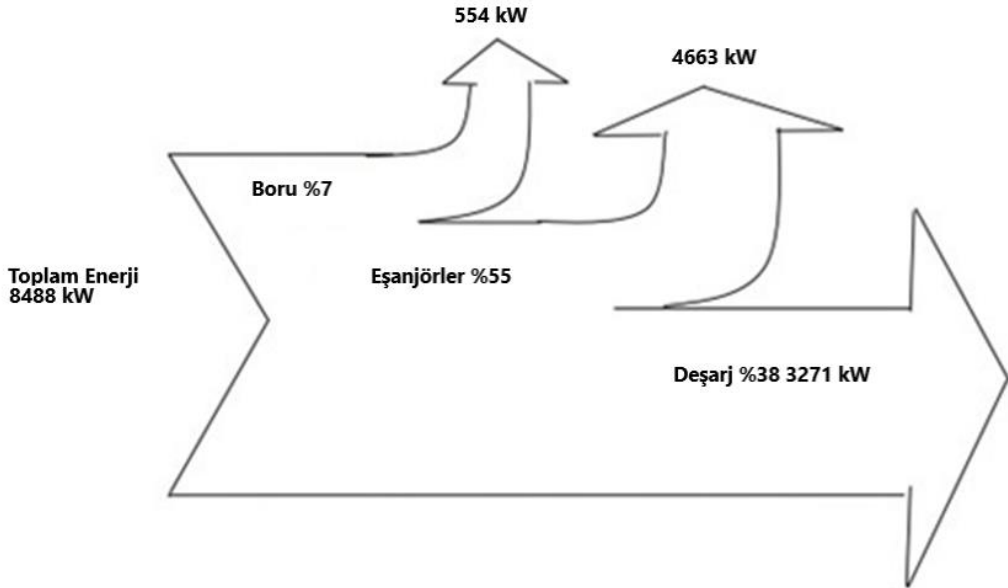


Şekil 3-3: Kış ve Bahar döneminde ortaya çıkan ekserji kayıpları

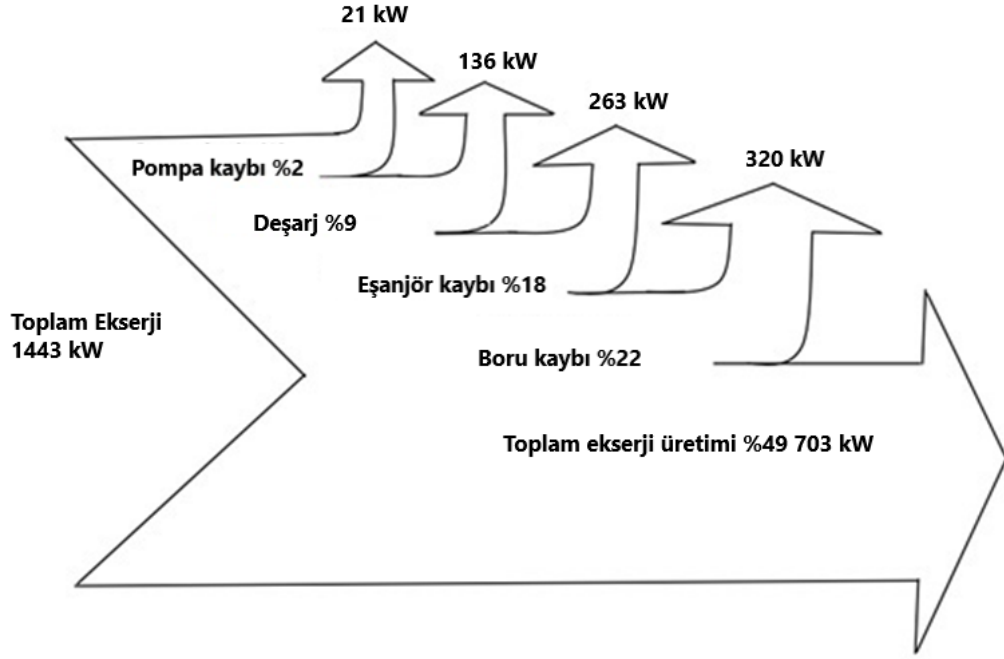
Şekil 3-4, 3-5'te Kış ve bahar dönemlerinde enerji akış diyagramları ve Şekil 3-6, 3-7'de Kış ve bahar dönemlerinde ekserji akış diyagramları verilmiştir.



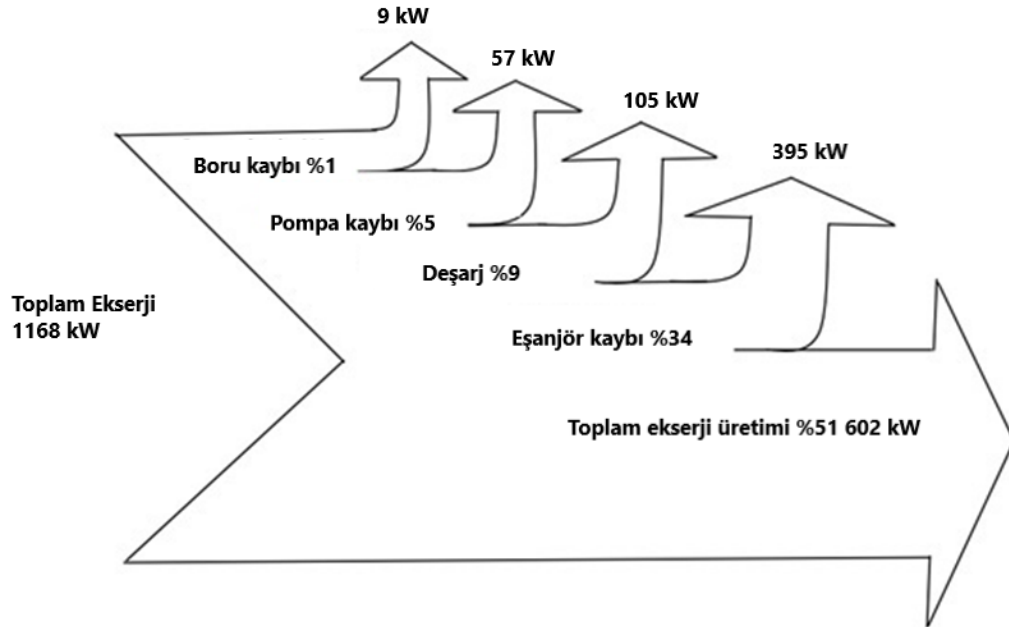
Şekil 3-4: Sındırgı JBIS Kış dönemi enerji akış diyagramı



Şekil 3-5: Sındırgı JBIS Bahar dönemi enerji akış diyagramı

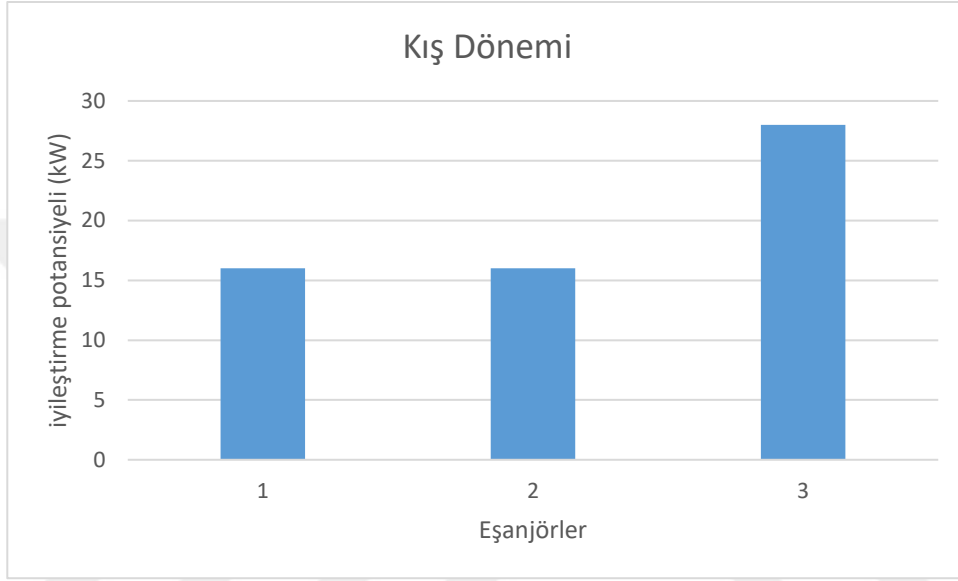


Şekil 3-6: Sındırgı JBIS Kış dönemi ekserji akış diyagramı

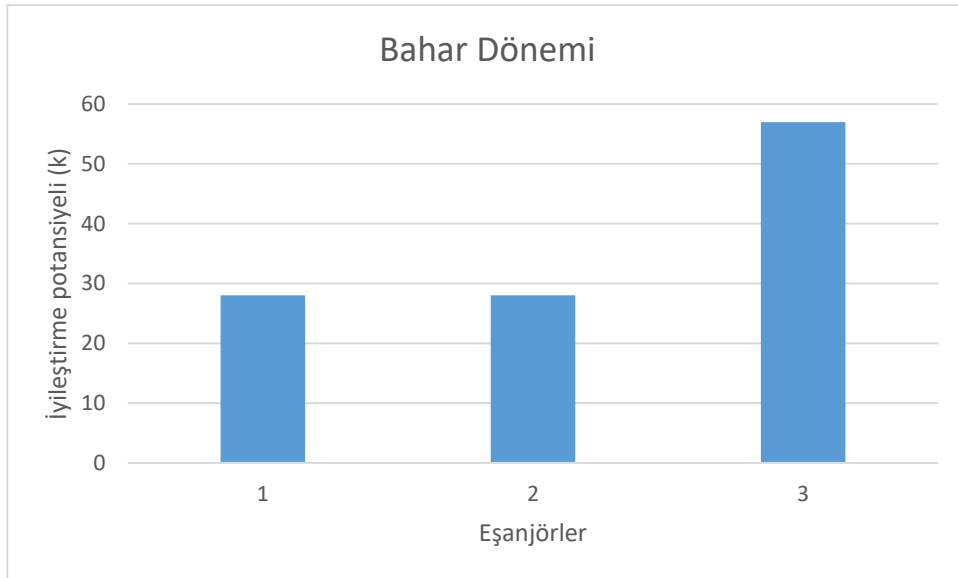


Şekil 3-7: Sındırgı JBIS Bahar dönemi ekserji akış diyagramı

Hammond and Stapleton [61] tarafından bir sistemin ne kadar geliştirilebilirlik potansiyeli olduğu gösteren ve ‘iyileştirme potansiyeli (IP)’ olarak ifade edilen bir bağıntı geliştirilmiştir. Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde bulunan ısı eşanjörleri için iyileştirme potansiyeli $IP = (1 - \varepsilon)(\dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{çıkan})$ denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. En yüksek iyileştirme potansiyeli kış döneminde (28 kW) 3 numaralı eşanjörlerde meydana gelirken, bahar döneminde (57 kW) yine 3 numaralı eşanjörde meydana gelmiştir (Şekil 3-8, 3-9).



Şekil 3-8: Kış döneminde eşanjör iyileştirme potansiyeli



Şekil 3-9: Bahar döneminde eşanjör iyileştirme potansiyeli

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi Türkiye’deki sayısı 20’den fazla olan ve Balıkesir ilinde sayısı beş adet olan jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinden birisidir. Jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ile günümüz itibarıyla 4650 KE ısıtma gerçekleştirilmektedir. Ayrıca jeotermal kaynaklardan otel kullanım suyu, seracılık, balıkçılık ve sebze ve meyve kurutma gibi birçok alanda faydalanılmaktadır. Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde yapılan ölçümler ve gözlemler neticesinde elde edilen sistem verileri kullanılarak sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır.

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi kış ve bahar aylarında aktif olarak çalışmakta yaz döneminde ise sistemin faaliyeti durdurulmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada iki farklı referans sıcaklığı dikkate alınarak kış dönemi (0.1 °C) ve bahar dönemi (10 °C) olarak enerji ve ekserji analizi ayrı ayrı yapılmıştır. Daha sonra mevsimsel ortalamalar dikkate alınarak yıllık değerler elde edilmiştir. Kış döneminde enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %52 ve %49 olarak elde edilirken, bahar döneminde enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %55 ve %51 olarak elde edilmiştir. Referans sıcaklığının artmasıyla birlikte verim değerleri de artmıştır. Yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri ise sırasıyla %54 ve %50 olarak elde edilmiştir.

Sistemde enerji kayıpları deşarj, eşanjör ve borularda meydana gelirken, ekserji kayıpları ise boru, pompa deşarj ve eşanjörlerde meydana gelmektedir. Referans sıcaklığının artmasıyla birlikte sistemdeki enerji kayıpları değerlendirildiğinde boru kayıpları azalırken deşarj kayıpları ise artmıştır. Ekserji kayıpları değerlendirildiğinde ise boru ve deşarj kayıpları azalırken, eşanjör ve pompa kayıpları ise artmıştır.

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde kuyular ve ısı merkezi arasında mesafenin fazla olması nedeniyle pompalama maliyeti önemli oranda arttıracağı için reenjeksiyon yapılmamaktadır. Reenjeksiyon sistem parametrelerinin korunması ve rezervuarın sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için oldukça önemlidir. Reenjeksiyon yapılmaması Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi için önemli bir dezavantajdır.

Jeotermal bölgesel ısıtma sisteminde ısıtılan konutların bir kısmında yalıtım uygulaması bulunmakla birlikte eksik ve yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde ısıtılan konutların yapı bileşenlerinde optimum yalıtım uygulamalarının tamamlanması sistem verimine önemli katkı sağlayacaktır. Ayrıca konutlarda tüketilen ısı miktarı dikkate alınarak ısınma bedeli ödenmesi için kalorimetre uygulaması yapılması da yine sistem verimini arttıracaktır.

Sındırgı jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ısı merkezinde teknik donanım incelendiğinde, manuel uygulamalar yerine sistem üzerinde otomatik kontrol sistemlerinin uygulanması ve yeni teknolojilerin kullanılarak ısı merkezinin güncellenmesinin sağlanması yine sistemin verimli işletilmesi açısından önemlidir. Eşanjörlerin daha verimli kullanılabilmesi için giriş çıkış debilerinin kontrolünün sağlanması ve manometre montajı yapılarak fark basınçların takibi önemlidir.

Bununla birlikte Sındırgı jeotermal kaynakların bulunduğu sahada doğal çıkışlı birçok kaynağın bulunması jeotermal enerjiden konut ısıtma dışında birçok alanda faydalanabilmeyi sağlamaktadır. Bölgede bulunan birkaç otelin sıcak su ihtiyacının karşılanması, seracılık ve balık yetiştiriciliği bunlardan bazılarıdır.

Sındırgı jeotermal kaynaklarının özgül ekserji indeksi 0.056607 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Sındırgı jeotermal kaynakların "**Orta Kaliteli Jeotermal Kaynak**" sınıfına girdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak fosil yakıt rezervlerinin giderek azaldığı ve enerji tüketiminin sürekli arttığı günümüzde yenilenebilir enerji potansiyelinin daha verimli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Jeotermal enerji özelinde sistemlerin verimliliğinin artırılması için enerji izleme sistemi ve saha enstrümanlarının otomasyon donanımlarının kurulması, reenjeksiyon uygulamalarıyla rezervuarın beslenmesinin sağlanması, uygulanması zorunlu standartlar oluşturulması, jeotermal sahaların daha etkin kullanılabilmesi için AR-GE merkezlerinin kurulması hem ekonomiye hem de çevreye olumlu katkı sağlanması açısından önemlidir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59 (692), 86-114.
- [2] Koç, E. & Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- [3] Öztürk, H.H. (2021). Yenilenebilir Enerji Kaynakları. İstanbul: Birsan Yayınevi, pp.667.
- [4] <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> (Erişim tarihi: 04.03.2023).
- [5] <https://ourworldindata.org/renewable-energy> (Erişim tarihi: 04.03.2023).
- [6] Elektrik Üretim Anonim Şirketi (2022) Yıllık Faaliyet Raporu.
- [7] Arslan, E. (2006). Jeotermal Enerjiden Yararlanılarak Kuyu İçi Eşanjörü Yardımıyla Konut Isıtılması ve Sıcak Su İhtiyacının Karşıllanması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [8] Etemoğlu, A.B., Can, M., & Kılıç, M. (2004). Ülkemiz Jeotermal Kaynaklarının İkinci Kanun Verim Değerlerine Bağlı Sınıflandırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 9, Sayı 1, Bursa.
- [9] Er, Şenol (2021). Jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi ile ilgili bilinmesi gerekenler, MB Holding.
- [10] Canik, B., Çelik, M., & Arıgün, Z. (2000). Jeotermal Enerji, A.F.Ü.Ü. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, No:59.
- [11] <https://elektrikinfo.com/jeotermal-enerjinin-avantajlari-ve-dezavantajlari/> (Erişim tarihi: 02.04.2023).
- [12] Karagüç, B. (2013). Balıkesir İlinde Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Ekonomik Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Balıkesir.
- [13] Şen, O. & Yılmaz, C. (2022). Jeotermal ve güneş destekli güç üretimi ve ısıtma sisteminin termodinamik analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (3), 1625-1637.
- [14] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022). <https://www.irena.org/geothermal> <https://www.irena.org/geothermal> (Erişim tarihi: 02.01.2023).
- [15] Kabeyi, M.J.B. & Olanrewaju O.A. (2022). Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. *Energy Strategy Reviews*, 39, 100735.

- [16] <https://www.thinkgeoenergy.com/> (Erişim tarihi: 02.01.2023).
- [17] <https://www.iea.org/reports/geothermal-power> (Erişim tarihi: 15.01.2023).
- [18] Lund, J.W. & Toth, A.N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.
- [19] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/jeotermal-harita/images/1.jpg> (Erişim tarihi: 15.01.2023).
- [20] Akkuř, İ. (2017). Mavi Gezegen, 23.
- [21] Zaim, A. & Çavřı, H. (2018). Türkiye’deki Jeotermal Enerji Santrallerinin Durumu. *Mühendis ve Makine*, 59 (691), 45-58.
- [22] Serpen, U. & DiPippo, R. (2022). Turkey-A geothermal success story: A retrospective and prospective assessment. *Geothermics*, 101, 102370.
- [23] Yamanlar, ř., Korkmaz, E.D., & Serpen U. (2020). Assessment of geothermal power potential in Buyuk Menderes Basin, Turkey. *Geothermics*, 88, 101912.
- [24] Hutterer, G.W. (2021). Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress*, Reykjavik, Iceland, April- October 2021.
- [25] Balıkesir İli 2017 Yılı Çevre Durum Raporu, (2018). Balıkesir Çevre ve şehircilik İl Müdürlüğü, Balıkesir.
- [26] Davraz, A., Nalbantçılar, M. T., & Önden, İ. (2022). Hydrogeochemical characteristics and trace element of geothermal systems in Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 195, 104666.
- [27] Keçebaş, A. (2013). Energetic, exergetic, economic and environmental evaluations of geothermal district heating systems: An application. *Energy conversion and management*, 65, 546-556.
- [28] Eslami, S., Noorollahi, Y., Marzband, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). District heating planning with focus on solar energy and heat pump using GIS and the supervised learning method: Case study of Gaziantep, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 269, 116131.
- [29] Aslan, A., Yüksel, B., & Akyol, T. (2014). Effects of different operating conditions of Gonen geothermal district heating system on its annual performance. *Energy conversion and management*, 79, 554-567.

- [30] Yamankaradeniz, N. (2016). Thermodynamic performance assessments of a district heating system with geothermal by using advanced exergy analysis. *Renewable Energy*, 85, 965-972.
- [31] Stegnar, G., Staničić, D., Česen, M., Čižman, J., Pestotnik, S., Prestor, J., ... & Merše, S. (2019). A framework for assessing the technical and economic potential of shallow geothermal energy in individual and district heating systems: A case study of Slovenia. *Energy*, 180, 405-420.
- [32] Yazici, H. (2016). Energy and exergy based evaluation of the renovated Afyon geothermal district heating system. *Energy and Buildings*, 127, 794-804.
- [33] Arat, H. & Arslan, O. (2017). Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump. *Energy*, 119, 1159-1170.
- [34] Chen, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Sustainability evaluation and sensitivity analysis of district heating systems coupled to geothermal and solar resources. *Energy Conversion and Management*, 220, 113084.
- [35] Shamoushaki, M., Fiaschi, D., Manfrida, G., & Talluri, L. (2022). Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses of a geothermal power plant with NCGs reinjection. *Energy*, 244, 122678.
- [36] Leveni, M., Manfrida, G., Cozzolino, R., & Mendecka, B. (2019). Energy and exergy analysis of cold and power production from the geothermal reservoir of Torre Alfina. *Energy*, 180, 807-818.
- [37] Ozcan, H. G., Hepbasli, A., Abusoglu, A., & Anvari-Moghaddam, A. (2023). Energy, exergy, economic, environmental and sustainability (4ES) analyses of a wastewater source heat pump system for district heating applications based on real operational data. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103077.
- [38] Açikkalp, E., Hepbasli, A., Palmero-Marrero, A. I., & Borge-Diez, D. (2023). Application of net zero extended exergy buildings concept for sustainable buildings analysis. *Journal of Building Engineering*, 68, 106095.
- [39] Yüksel, B., Aslan, A., & Akyol, T. (2012). Investigation of seasonal variations in the energy and exergy performance of the Gonen geothermal district heating system. *Applied Thermal Engineering*, 36, 39-50.
- [40] Etemoglu, A. B., & Can, M. (2007). Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1596-1606.

- [41] Galantino, C. R., Beyers, S., Anderson, C. L., & Tester, J. W. (2021). Optimizing Cornell's future geothermal district heating performance through systems engineering and simulation. *Energy and Buildings*, 230, 110529.
- [42] Lee, J. S., Kim, H. C., & Im, S. Y. (2017). Comparative analysis between district heating and geothermal heat pump system. *Energy Procedia*, 116, 403-406.
- [43] Manente, G., Lazzaretto, A., Molinari, I., & Bronzini, F. (2019). Optimization of the hydraulic performance and integration of a heat storage in the geothermal and waste-to-energy district heating system of Ferrara. *Journal of cleaner production*, 230, 869-887.
- [44] Alkan, M. A., Keçebaş, A., & Yamankaradeniz, N. (2013). Exergoeconomic analysis of a district heating system for geothermal energy using specific exergy cost method. *Energy*, 60, 426-434.
- [45] Topal, H. İ., Tol, H. İ., Kopaç, M., & Arabkoohsar, A. (2022). Energy, exergy and economic investigation of operating temperature impacts on district heating systems: Transition from high to low-temperature networks. *Energy*, 251, 123845.
- [46] Dickson, M. H. & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy Utilization and Technology*, France: UNESCO, 53-77.
- [47] Akyol, T. (2016). Bigadiç-Balıkesir Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [48] <https://jeotes.com/jeotes-plakali-isi-degistirici-nasil-calisir-5> (Erişim tarihi: 12.12.2022)
- [49] Küçüka, S. (2001). Jeotermal Bölge Isıtması Dağıtım Sistemlerinin Genel Esasları, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.
- [50] Keçebaş, A. (2013). Enerji tasarrufu için yer altına gömülü çelik borularda yalıtımın ekonomik faydaları, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 29 (3): 206-212.
- [51] Ertöz, A.Ö. & Duymuş, E. (2014). Jeotermal Akışkanların Pompajı, Jeotermal Enerji Semineri, <http://mmoteskon.org/wp-content/uploads/2014/12/2003JEO-05.pdf> (Erişim tarihi: 02.11.2022).
- [52] Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(1-2), 3-65.
- [53] Kaya, D. & Öztürk H. (2015). *Jeotermal enerji Uygulamaları*, ISBN: 9786055100391, ss:184.
- [54] Aygün, H. (2003). Korozyon ve Jeotermal Uygulamalar, Jeotermal Enerji Semineri, TESKON.
- [55] Dickson, M. H. & Fanelli, M. (2013). *Geothermal energy: utilization and technology*.

- [56] Rosen, M. A. (2002). Does industry embrace exergy?. *Exergy, An International Journal*, 2(4), 221-223.
- [57] Terzi, R. (2018). Application of Exergy Analysis to Energy Systems, DOI: 10.5772/intechopen.74433.
- [58] Dincer, I. (2002). The role of exergy in energy policy making. *Energy policy*, 30(2), 137-149.
- [59] Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2008). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık ve Dağıtım Pazarlama San. ve Ltd. Şti.* (Çev: A. Pınarbaşı, E. Buyruk, C. Özalp, A. Bilgin, H. Günerhan ve S. Basan).
- [60] Lee, K.C. (2001). Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 431-442.
- [61] Hammond, G. P. & Stapleton, A. J. (2001). Exergy analysis of the United Kingdom energy system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 215(2), 141-162.