



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



JEOTERMAL SULARIN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yüksek Lisans Tezi

Gaye HÜRÇAN ALTUNDAĞ

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

İzmir

2024

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

JEOTERMAL SULARIN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Gaye HÜRİCAN ALTUNDAĞ

Danışman: Prof. Dr. Sezai DELİBACAK

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı
Toprak Bilimi Yüksek Lisans Programı

İzmir

2024

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Jeotermal Suların Çevresel Etkilerinin Araştırılması**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

07 / 02 / 2024

Gaye HÜRÇAN ALTUNDAĞ

ÖZET**JEOTERMAL SULARIN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

HÜRÇAN ALTUNDAĞ, Gaye

Yüksek Lisans Tezi, Toprak Bilmi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sezai DELİBACAK

Şubat 2024, 86 sayfa

Bu çalışmada, ülkemizin de sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerjinin çevresel etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. İnsanlık tarihi kadar eski olan jeotermal enerji ve sıcak su kaynağı, dünyada çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Yıllar boyu enerji üretiminde fosil yakıtların kullanılmasıyla atmosfere salınan sera gazları; hem iklim krizine hem de doğal dengedeki bozulmalara neden olmuştur. Türkiye, küresel anlamda doğal gaz ve petrol gibi enerji kaynakları açısından yoksul, jeotermal kaynaklar açısından oldukça bereketli bir ülkedir. Jeotermal enerjinin çevreyi olumsuz etkilediği durumlara bakıldığında, akışkanların re-enjeksiyonunda yaşanan sorunlar ve ihmaller en sık karşılaşılan sebepler olmuştur. Jeotermal kaynakların kendini yenileyebilecek uygulamalarla kullanımının mümkün hale getirilmesi bir zorunluluktur. Aksi halde, insanlığın geleceği için oldukça önemli bir potansiyele sahip olan bu kaynakların zaman içerisinde potansiyellerinde önemli düşüşler gözlenecektir. Oysaki doğru mühendislik uygulamalarıyla, eğitimlerin ve denetimlerin güçlendirilmesiyle bunun önüne geçilebileceği ortaya konmuştur. Santrallerin çalışması sırasında, jeotermal akışkanın (Sıvı+NCG) tamamının re-enjeksiyonunu garanti edebilen teknolojilerin, atmosferik ortamdaki salınımları engellemek için en etkili yöntemler olduğu bulunmuştur. Bütün dünyayı ilgilendiren enerji arzı ve kaynakların sürdürülebilirliği konusunda, uluslararası, ulusal ve yerel tüm aktörler birlikte ve çevreci bir yaklaşımla hareket etmelidir. Paris Anlaşması'nda da vurgulandığı üzere sanayi devrimi öncesi dönemle karşılaştırıldığında küresel ısınmanın mümkün olduğunca 2 °C'nin altında tutulması amacıyla küresel olarak birincil enerji kaynak

kullanımında geleneksel karbon bazlı enerji kaynaklarını terk etmek bir zorunluluk haline gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Çevre, enerji, jeotermal, küresel ısınma.



ABSTRACT**INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL EFFECTS OF
GEOTHERMAL WATERS**

HÜRÇAN ALTUNDAĞ, Gaye

MSc Thesis in Department of Soil Science and Plant Nutrition

Supervisor: Prof. Dr. Sezai DELİBACAĞ

February 2024, 86 pages

This study aims to investigate the environmental effects of geothermal energy, one of the renewable energy sources that our country also possesses. Geothermal energy and hot water resources, which are as old as human history, have been used for various purposes in the world. Greenhouse gases released into the atmosphere due to the use of fossil fuels in energy production for years have caused both the climate crisis and disruptions in the natural balance. Turkey is a country that is relatively poor in terms of energy resources such as natural gas and oil, but very rich in terms of geothermal resources. When considering the cases in which geothermal energy has had a negative impact on the environment, problems in the reinjection of fluids and negligence have been the most common causes. It is a necessity to make it possible to use geothermal resources via renewable applications. Otherwise, these resources, which have a very important potential for humanity, will see significant declines in their potential over time. This can be prevented by implementing proper engineering practices, better training and supervision. It has been found that technologies that can guarantee the complete reinjection of geothermal fluid (liquid+NCG) during the operation of power plants are the most effective methods for preventing emissions to the atmospheric environment. In order to ensure the sustainability of energy supply and resources, which concerns the whole world, all international, national and local actors should act together and with an environmental approach. As emphasized in the Paris Agreement, it is now a necessity to abandon traditional carbon-based energy

sources in primary energy consumption worldwide in order to keep global warming under 2 °C compared to the pre-industrial period.

Keywords: Environment, energy, geothermal, global warming.



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan ve ülkemizin doğal zenginliklerinden sayılan jeotermal enerjinin çevresel etkileri incelenmiştir. Dünyada gün be gün artan nüfus ve endüstrileşme ile beraber artan enerji talebi, çevresel krizler karşısında ülkemizin ve diğer ülkelerin çalışmaları, hedefleri ve yıllara göre değişimleri değerlendirilmiştir. Bu derleme çalışmada konu hakkında gerek ulusal gerekse uluslararası yapılmış bilimsel araştırmalar ve çalışmalar, yayınlanmış raporlar, haberlere konu olmuş çevresel olaylar, belgeseller incelenerek tek bir çalışmada sunulmaya gayret edilmiştir. Gelecek çalışmalar için katkı sağlayacağı ümit edilmektedir.

İZMİR

07 / 02 / 2024

Gaye HÜRCAN ALTUNDAĞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yenilenebilir Enerji ve Önemi.....	2
1.2 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji.....	4
1.3 Jeotermal ve Jeotermal Enerji.....	7
1.3.1 Jeotermalin kullanım alanları	11
2. LİTERATÜR BİLDİRİŞLERİ	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. JEOTERMAL ENERJİNİN ÖNEMİ VE TARİHÇESİ.....	28
4.1 Tarihçe	28
4.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji.....	31
4.3 Dünyanın Önde Gelen Jeotermal Enerji Sahibi Ülkeleri	40
4.3.1 Genel bakış.....	40
4.3.2 İyi Örnekler: Yeni Zelanda ve İzlanda.....	42
4.4 Türkiye’de ve Dünyada Elde Edilen Enerji Miktarları ve Potansiyel Enerji Varlıkları	45
5. JEOTERMAL ENERJİNİN TEMEL ESASLARI	49
5.1 Jeotermal Suların (akışkanların) Özellikleri	49
5.1.1 Jeotermal akışkanlarda değerli metal oluşumu ve kazanımı.....	51
5.2 Jeotermal Enerji Tesislerin Özellikleri	52
5.2.1 Jeotermal (Toprak) kaynaklı ısı pompaları ve bölgesel ısıtma	55
6. JEOTERMAL ENERJİ KULLANIMININ ARTMASIYLA OLUŞABİLECEK OLASI ÇEVRESEL ETKİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	57
6.1 Olumlu Etkiler.....	58
6.2 Olumsuz Etkiler ve Riskler	60

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.1 Hava kirliliği ve gaz emisyonları.....	60
6.2.2 Su kirliliği	62
6.2.3 Katı emisyonları.....	63
6.2.4 Gürültü kirliliği.....	63
6.2.5 Arazi kullanımı	64
6.2.6 Arazi çökmesi	65
6.2.7 Sismik tetikleme	66
6.2.8 Doğal yaşam habitatına ve bitki örtüsüne müdahale	66
6.2.9 Doğal manzaranın bozulması	67
6.2.10 Katastrofik olaylar	68
7. TARTIŞMA.....	69
8. SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	81
TEŞEKKÜR	85
ÖZGEÇMİŞ.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Elektrik kurulu kapasitesinde yenilenebilir kaynakların gelişimi.	6
1.2. Jeotermal kaynak oluşumu ve kullanımı.	9
1.3. Jeotermal ile ilişkili kavramlar.	10
1.4. Türkiye’de jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma yapılan şehirler ve konut eşdeğerleri.	14
1.5. Sağlık Bakanlığı’na göre (2021), Türkiye’de termal turizm tesisi, kaplıca bulunduran şehirler ve yaklaşık tesis sayıları.	15
1.6. Türkiye’deki mevcut jeotermal sera ısıtma ve kurutma uygulamaları.	16
4.1. Türkiye jeotermal kaynak alanları ve sıcaklık dağılımı.	31
4.2. Türkiye jeotermal kaynaklar ve volkanik alanlar haritası.	32
4.3. Türkiye’nin genç tektonik unsurları ve jeotermal kaynakları.	34
4.4. Ülkemizde yıllara göre jeotermal enerjiye dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi.	35
4.5. Türkiye’de jeotermal elektrik santrallerinin kapasitesinin gelişimi (MWe).	36
4.6. Ülkemizdeki bölgelerin jeotermal kaynak potansiyelleri.	36
4.7. Dünya genelindeki jeotermal kaynaklarının doğrudan kullanım ve/veya elektrik üretimine uygunlukları.	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8. 1990-2010 ve 2035 talep senaryolarına göre dünya birincil enerji arzı içinde kaynakların miktarı.	46
4.9. Dünyada jeotermal üretiminin artışı.	48
5.1. Jeotermal kaynak oluşumu ve kullanım alanları.....	50
5.2. Jeotermal güç çevrimi örnekleri.	53
5.3. Kademeli jeotermal güç çevrimi örneği.....	54
5.4. İzmir Jeotermal Bölge Isıtma Sistemi tasarım kriterleri.	55
5.5. Bölgesel ısıtma şebekesi çeşitleri.	56
5.6. İki borulu dağıtım sistemleri şematik gösterimleri, (a) düz geri dönüşlü, (b) ters geri dönüşlü.	56
6.1. Enerji kaynaklı CO ₂ emisyonunun yıllar içerisindeki değişimi.....	62
6.2. Hellisheidi Jeotermal Sahası'ndaki ses emici içeren kuyu başı örneği.	64
6.3. Miravelles jeotermal enerji santrali tipik boru hattı, Costa Rica.	65
6.4. Ahuachapán jeotermal tesisinin 1977 ve 2005 yıllarındaki görüntüleri	67
7.1. Alaşehir'de jeotermal su basmış bir üzüm bağı.....	71
7.2. Jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası.....	72
7.3. Jeotermal kaynaklı enerji depolama seçenekleri.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.4. Jeotermal ve güneş enerjisi ile hibrit uygulama örneği.....	76
7.5. Endonezya Wayang Windu'da katı atık yönetim sistemi.	77
7.6. MTA Genel Müdürlüğü'nün jeotermal enerjide hedefleri.....	78



TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. 0,5 °C'lik küresel ısınma artışının sebep olacağı etkiler.	3
1.2. Ulusal enerji kaynaklarındaki kurulu gücün Türkiye toplam kurulu gücü içerisindeki oranının yıllar içindeki gelişimi (MW).....	5
1.3. Türkiye'deki a) 2019 yılı kurulu elektrik gücünün kaynaklara göre dağılımı. b) farklı tip enerji kaynaklarının 2019 elektrik üretimindeki payları.	7
1.4. Jeotermal kaynak sıcaklığına göre uygulama alanları.	12
4.1. Jeotermal enerjinin tarihsel gelişimi.	30
4.2. Türkiye Jeotermal Derneği'ne göre (2020), Türkiye'de jeotermal merkezi ısıtma yapılan yerler.....	37
4.3. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası'na göre (2020), Türkiye'de jeotermal merkezi ısıtma yapılan yerler.....	37
4.4. Sera ısıtması yapılan alanlar.	38
4.5. Dünyada jeotermal enerji kaynaklı en yüksek kurulu güç kapasitesine sahip ülkeler (MW).	40
4.6. 2019-2023 yılları arası jeotermal enerjiden üretilen elektrik değerleri (MWe).....	46
4.7. Dünyada jeotermal kaynaklı güç üretim kapasiteleri.....	47
6.1. Çeşitli enerji santrallerine ait gaz emisyonları.....	61

1. GİRİŞ

Enerji, bir ülkenin ekonomik olarak gelişmesi ve sosyal kalkınması için gerekli temel girdilerden en önemlisidir. Artan nüfus, kentleşme, endüstrileşme, gelişen teknoloji ve insanların enerjiye bağlı istek ve gereksinmelerinin artması enerjiye olan talebi de hızla artırmaktadır. Küresel olarak, yenilenebilir enerjinin özümsemesi, global enerji dönüşümü ve iklim değişikliğiyle mücadele edilebilmesi için önemli bir strateji haline gelmiştir (Xia and Zhang, 2019).

Enerjinin tedariki her zaman toplumların refahını doğrudan etkileyen bir unsur olmuştur. Bu doğrultuda enerjinin kaynağı büyük önem arz etmektedir. Ülkeler, ihtiyaç duydukları enerji miktarını üretilmedikleri takdirde ithal etmektedirler. Günümüzde enerji, hayatın her alanında üretimi, sanayiye, sağlığı, bilimi yani yaşamın temel unsurlarını gerçekleştirmek için hayati önem taşıdığından, enerjide bağımsızlık bir ülkenin refahını doğrudan etkiler. Enerji üretimi kadar, üretilen enerjinin türü ve sürdürülebilirliği de refah seviyesini etkilemektedir. Enerji kaynağının sürdürülebilirliği ise çevre dostu olmasına bağlıdır.

Sosyal ve ekonomik olarak kalkınmadan bahsederken enerji kaynaklarına erişim oldukça önemlidir. Sanayi devriminin ardından ülkelerin enerji kaynaklarına olan talebi artışa geçmiştir ve halen artmaktadır. Kaya vd.na göre (2018), teknolojik gelişmeler ve asgari hayat şartlarının sağlanması gibi nedenlerle enerjiye ihtiyacı her geçen yıl %4-5 oranlarında yükselmektedir (Özbektaş vd., 2023). Bu artış ile birlikte fosil yakıtlar gibi yenilenemeyen kaynaklarla ekonomik olarak rekabet edemediği için ikinci planda kalmış olan, doğa dostu yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırımlar da artmaktadır. Dünya nüfusundaki artış, sanayileşme, dijitalleşme ve küreselleşme ile birlikte büyüyen ticaret ve üretim süreçlerine bağlı şekilde gıdaya, doğal kaynaklara ve enerjiye olan talep de büyümektedir. Tüm bunların yanı sıra küresel ısınma, iklim değişiklikleri ve afetler konuyu farklı bir boyuta taşımaktadır.

Türkiye, enerji tüketimi mevcut enerji üretiminden daha fazla olan ülkeler arasındadır. Ülkemiz enerji ihtiyacının yarısından azını yerli kaynaklarından

karşılatabilmektedir. Enerji talebini karşılayabilmek için ise enerji ithal etmektedir. Bu çalışmada ülkemizin de sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerjinin çevresel etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Dünyada jeotermal kaynağına sahip olan diğer ülkelerin de dâhil edileceği, mevzuatların, raporların, bilimsel araştırmaların, özel sektör araştırmalarının ve konuya yönelik haberlerin incelenmesiyle birlikte bu kaynağa ve potansiyeline olan bakış açısının bilimsel temellerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Yenilenebilir, entegre yapılar oluşturmaya uygun ve ekolojik bir kaynak olan jeotermal enerji çağa uygun ve doğa dostu mühendislik uygulamaları üretildiğinde ekolojik ayak izi en düşük olan enerji kaynaklarından biridir.

1.1 Yenilenebilir Enerji ve Önemi

Enerjinin yenilenebilir olması, doğanın kendi evrimi içinde, ertesi gün de aynı şekilde varlığını sürdürebilen enerji kaynağını ifade etmektedir. (Yılmaz ve Öziç., 2018) Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, hidro, rüzgar, jeotermal, odun, bitki artıkları, biyokütle, gel-git ve dalga olarak kabul edilmektedir. Bu doğal varlıklardan çeşitli mühendislik uygulamalarıyla doğrudan kullanıma hazır ya da dönüştürülebilen çeşitli enerjiler elde edilebilmektedir. Yenilenebilen enerji kaynakları temiz enerji sağlama potansiyelleri bakımından çok önemlidirler.

Yenilenebilir enerji kaynakları, tükenmez olmaları, çevresel risklerinin minimum olmasıyla çevre dostu, işletme/bakım maliyetlerinin düşük olmasıyla ucuz, ulusal nitelikte ve güvenilir olmaları nedeniyle her ülke için oldukça önemlidir.

Dünyada 2020 yılı verilerine göre arzının %87'si fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Araştırmacıların ve uzmanların enerji kaynakları konusundaki tahminlerine göre petrol rezervlerinin yaklaşık 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin ise 60 yıl ömrü kalmıştır. (Akkuş, 2020) Bu duruma ek olarak fosil yakıtların ve sürdürülebilirliği göz ardı eden uygulamaların neden olduğu iklim krizi de düşünüldüğünde yenilenebilir ve çevreci enerji üretimi dünyamız için daha da önem kazanmaktadır.

Fosil yakıt odaklı gelişen enerji sektörü de güncel iklim krizleri ve küresel ihtiyaçları takip ederek, insan sağlığı, ekoloji ve sürdürülebilirlik gibi unsurların öne çıkmasıyla birlikte çevresel etkileri düşük ve yenilenebilir doğal kaynaklara yönelmektedir. Yenilenebilir enerji alanında devletlerin de özel sektörün de katılımları ve yatırımları artmaktadır.

Tüm dünyayı olumsuz şekilde etkileyen iklim değişikliğine ve çevresel problemlere sebep olmasıyla fosil yakıtlar kritik bir yerdedir. Yıllar boyu enerji üretiminde fosil yakıtların kullanılmasıyla atmosfere salınan sera gazları; hem iklim krizine hem de doğal dengedeki bozulmalara neden olmuştur. Ekolojik açıdan fosil yakıt kaynaklarının kullanımını azaltmak demek, enerji arzının karşılanabilmesi için enerji üretiminde kaynakların çoğaltılması ve alternatif çözümler geliştirilmesi gerektirmektedir. Yenilenebilir olmasının yanı sıra yeni olan enerji kaynaklarına yönelmek işte bu nedenle doğru bir adımdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları günümüzde elektrik üretimi, tıp, turizm, tarım, sanayi gibi insan hayatının refahı için oldukça önemli pek çok alanda kullanılabilen bir kaynaktır. Küresel ısınmanın olası etkileri Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. 0,5 °C’lik küresel ısınma artışının sebep olacağı etkiler (Dinçer ve Ezan, 2020).

ETKİ	1,5°C'nin etkisi	2°C'nin etkisi	2°C'nin etkisi
Bitki Türlerinin Kaybı	%8 Yaşanabilir alanlarının yarısını kaybedecek bitki oranı	%16 Yaşanabilir alanlarının yarısını kaybedecek bitki oranı	2 kat daha kötü
Böcek Türlerinin Kaybı	%6 Yaşanabilir alanlarının yarısını kaybedecek böcek oranı	%18 Yaşanabilir alanlarının yarısını kaybedecek böcek oranı	3 kat daha kötü
Mercan Resiflerindeki Azalma	%70 – %90	%90	%29 daha kötü
Aşırı Isı Dalgaları	%14 Her 5 yılda bir küresel nüfusun aşırı ısı dalgasına maruz kalma oranı	%37 Her 5 yılda bir küresel nüfusun aşırı ısı dalgasına maruz kalma oranı	2,6 kat daha kötü
Kuzey Kutbunda Yaz Deniz-Buzunun Olmaması	Her 100 yılda en az 1 kere	Her 10 yılda en az 1 kere	10 kat daha kötü

Daha çevreci uygulamalar geliştirmenin, iklim krizini iyileştirici ve önleyici faaliyetler ve araştırmalar yapmanın önemi büyüktür.

Endüstrinin gelişmesi, insanın hayat standartlarının yükselmesi ve dijitalleşme ile beraber küresel siyasi süreçlerin şekillenmesinde ülkelerin sahip oldukları enerji kapasiteleri, bu kapasiteyi ne biçimde kullandıkları, kullanım verimlilikleri ve değerlendirme, izleme/denetleme ve geliştirebilme biçimleri de etkin olmaktadır. Ülkelerin siyasi güçleri, enerji bağımsızlıklarından etkilenmektedir (Karabağ vd., 2021). Bütün bunların ışığında gelecek projeksiyonlarında üretim hedeflerinde ve planlamalarında yenilenebilir enerji kapasitelerinin çoğaltılması için araştırmalar ve uygulamalar da çoğalmaktadır.

Jeotermal akışkanlardan elde edilen enerji de yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Jeotermal enerji; yer kabuğunun farklı derinliklerinde biriken ısının meydana getirdiği, jeolojik yapıyla ilişkili olarak yer kabuğunun erişilebilir derinliklerinde, direkt ya da farklı enerji türlerine dönüştürülerek faydalanabilen, yeryüzüne çatlaklar ve kırıklar boyunca gaz, buhar ve su ile taşınabilen doğal kaynak enerjisidir (Şener vd., 2022).

İnsanlık tarihi kadar eski olan jeotermal enerji ve sıcak su kaynağı, dünyanın çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. “*Yerkürenin sahip olduğu ısı enerjisi*” de denen bu yenilenebilir doğal kaynak gelecek yıllarda da insanların enerji, sağlık, gıda gibi ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde hayatında olacaktır.

1.2 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji

Yılmaz’a göre (2012), Türkiye yer şekil özellikleri sayesinde önemli derecede rüzgâr ve hidrolik enerji potansiyeline, coğrafi konumunun sağladığı avantajla önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bunların yanında jeotermal enerji bakımından dünya potansiyelinin %8’ini oluşturmaktadır (Özbektaş vd., 2023).

Ülkemizde 2006 yılının ardından jeotermal ve rüzgârda güçlü bir yükseliş gözlenmektedir. 2006 yılında 23 MW düzeyinde olan jeotermalden elde edilen kurulu gücümüz 2018 yılından itibaren 1282,5 MW’a çıkmıştır. Rüzgâr santrallerindeki kurulu gücümüz ise 59 MW düzeyinden 7005,4 MW’a çıkmıştır (Dinçer ve Ezan, 2020). Bu gelişme ülkemiz için oldukça önemli, gerekli ve gurur verici bir tablodur.

Tablo 1. 2.'ye göre, 2000 yılında yerli enerji kaynaklarına ait kurulu güç, toplam kurulu gücün %66,3'ünü oluşturmaktaydı. Bu oran, 2018 yılına kadar %59,5'e kadar geriledi. Bu düşüş, özellikle doğal gaz ve kömür gibi ithal enerji kaynaklarından elektrik üretiminde artışa işaret etmektedir.

Tablo 1.2. Ulusal enerji kaynaklarındaki kurulu gücün Türkiye toplam kurulu gücü içerisindeki oranının yıllar içindeki gelişimi (MW) (Dinçer ve Ezan, 2020).

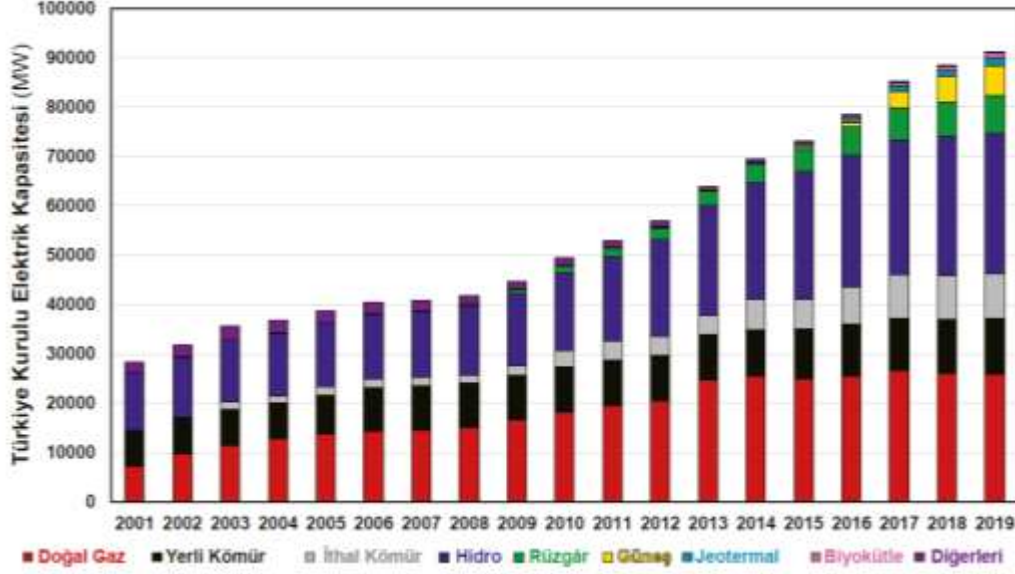
Yıllar	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Yenilenebilir Atık + Atık Isı	Linyit	Taşkömürü + Asfaltit	Yerli Kaynak Kurulu Gücü	Türkiye Toplam Kurulu Gücü	Yerli Kaynak Payı %
2000	11175,2	17,5	18,9		23,8	6508,9	335,0	18079,3	27204,1	66,3
2001	11672,9	17,5	18,9		23,6	6510,7	335,0	18578,6	28332,4	65,6
2002	12240,9	17,5	18,9		27,6	6502,9	335,0	19142,8	31845,8	60,1
2003	12578,7	15,0	18,9		27,6	6438,9	335,0	19414,1	35587,0	54,6
2004	12645,4	15,0	18,9		27,6	6450,8	335,0	19492,7	36824,0	52,9
2005	12906,1	15,0	20,1		35,3	7130,8	335,0	20442,3	38843,5	52,6
2006	13062,7	23,0	59,0		41,3	8210,8	335,0	21731,7	40564,8	53,8
2007	13394,9	23,0	147,5		42,7	8211,4	335,0	22154,5	40835,7	54,3
2008	13828,7	29,8	363,7		59,7	8205,0	335,0	22821,9	41817,2	54,8
2009	14553,3	77,2	791,6		86,5	8199,3	470,0	24177,9	44761,2	54,0
2010	15831,2	94,2	1320,2		107,2	8199,3	470,0	26022,1	49524,1	52,5
2011	17137,1	114,2	1728,7		125,7	8199,3	470,0	27775,0	52911,1	52,5
2012	19009,4	162,2	2260,6		168,8	8193,3	470,0	30864,3	57059,4	54,1
2013	22289,0	310,8	2759,7		236,0	8223,2	470,0	34287,7	64007,5	53,6
2014	23643,2	404,9	3629,7	40,2	299,1	8281,3	470,0	36768,4	69519,8	52,9
2015	25867,8	623,9	4503,2	248,8	370,1	8663,4	755,0	41032,2	73146,7	56,1
2016	26681,1	820,9	5751,3	832,5	496,4	9126,5	755,0	44463,7	78497,4	56,6
2017	27273,1	1063,7	6516,2	3420,7	641,9	9129,1	782,5	48827,2	85200,0	57,3
2018	28291,4	1292,5	7005,4	5062,8	818,9	9456,1	782,5	52899,6	88550,8	59,5

Not: Çok yakıtlı santrallerin kurulu gücü dahil değildir.

Ancak, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar sayesinde, ulusal enerji kaynaklarına ait kurulu gücün toplam kurulu güç içerisindeki payı yeniden artışa geçmiştir.

Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücü içerisindeki, ulusal ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik kurulu gücünün %65 oranlarına yükseltilmesi hedeflenmektedir. (ETKB 2019). Bu artış, ülkemizin enerji güvenliğini sağlama ve çevresel etkileri azaltma hedeflerine katkıda bulunacaktır.

Türkiye'nin elektrik kurulu kapasitesinin yenilenebilir kaynaklardan oluşan kısmı yıllar içinde düzenli şekilde artmış göstermiştir. (Şekil 1.1.) Bu artış, Türkiye'nin enerji politikasında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar yaptığının da bir göstergesidir.



Şekil 1.1. Elektrik kurulu kapasitesinde yenilenebilir kaynakların gelişimi (Dinçer ve Ezan, 2020: 20).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde en büyük payı rüzgâr enerjisi almaktadır. İkinci sırada hidrolik enerji, ardından jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gelmektedir.

Özata ve Ölemez'e göre (2020), 2019 yıl sonu verilerine bakıldığında Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi kurulu güç kapasitesi 91270 MW'tir. Toplam kurulu güç kapasitenin %61,5'i ulusal ve yenilenebilir enerji kaynaklarına aittir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı %49,5 iken jeotermal enerji kaynaklı güç üretiminin oranı %1,66'dır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Türkiye, global anlamda doğal gaz ve petrol gibi enerji kaynakları açısından yoksul, jeotermal kaynaklar açısından oldukça bereketli bir ülkedir. Jeotermal enerjinin düşük kurulum maliyetleri, minimal çevresel zararları ve istihdam alanı yaratması ve öz kaynağımız olması, bu enerji kaynağını ülkemiz için çekici bir seçenek haline getirmektedir.

Ülkemizin en büyük jeotermal kaynakları Büyük Menderes Havzası'nda Pamukkale'yi de içrisine alan, Aydın-Germencik'ten Denizli-Kızıldere bölgesine dek uzanan alanda yer almaktadır. Bu yenilenebilir ve temiz enerji potansiyelini iyi anlamak ülkemizi hem ekonomide hem bilimde hem de sosyal kalkınmada ileriye götürecektir.

Doğal gaz ve kömür, ülkemizdeki elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olan enerji kaynaklarıdır (Tablo 1.3).

Tablo 1.3. Türkiye'deki a) 2019 yılı kurulu elektrik gücünün kaynaklara göre dağılımı. b) farklı tip enerji kaynaklarının 2019 elektrik üretimindeki payları (Dinçer ve Ezan, 2020).

Kaynak	Kapasite (MW)	Kaynak	Elektrik Üretimindeki Pay (%)
Doğal Gaz	25904	Doğal Gaz	18,64
Kömür	20284	Linyit	15,41
Hidro - Rezervuarlı	20643	Kömür	1,16
Hidro - Nehir Tipi	7861	Asfaltit	0,76
Rüzgar	7591	İthal Kömür	19,85
Güneş	5995	Fuel Oil	0,24
Jeotermal	1515	Biyokütle	1,49
Biyokütle	802	Jeotermal	2,93
Atık ısı	362	Hidrolik	29,21
Diğer Yakıtlar	312	Güneş	3,15
TOPLAM	91270	Rüzgar	7,16

Bu kaynaklar, ithal edilen enerji kaynaklarıdır. Bu nedenle, Türkiye'nin bu kaynaklara olan bağımlılığını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması gerekmektedir. Ülkemiz yenilenebilir öz kaynaklarını potansiyeline uygun ve çevre çözümlerle uygulanacağı bir gelecekte çok daha bağımsız, sosyal ve ekonomik refah düzeyi yüksek, kalkınmış bir ülke olacaktır.

1.3 Jeotermal ve Jeotermal Enerji

Jeotermal, Yunanca 'jeo' (yer) ve 'termal' (ısı) sözcüklerinin bir araya gelmesiyle türetilmiştir. Jeotermal enerji, yer kabuğunun farklı derinliklerindeki jeolojik oluşumlar sonucu biriken ve yakınındaki yeraltı ve yerüstü sularına kıyasla daha yüksek oranda tuzlar, erimiş mineraller ve gazlar barındıran, basınçlı sıcak su

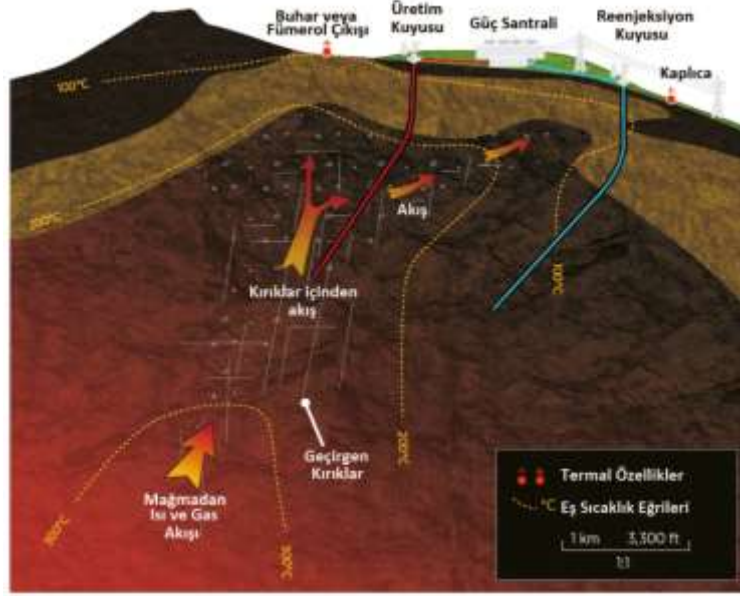
ve buhar formunda bulunan ve doğrudan kullanılabilceği gibi diğer enerji formlarına dđnüştürölerek de faydalanılabilecek bir hidro-termal enerji kaynağıdır.

Jeotermal akışkanlar, yer kabuğundaki geğirgen kırıklar aracılığıyla yüzeje doğru hareket eder. Bu süreçte, yer kabuğunun derinliklerinde biriken yüksek sıcaklıklı enerji, buhar ve sıcak su formunda yeryüzüne ulaşır ve jeotermal enerji kaynakları olarak kullanılabilir (şekil 1.2).

Jeotermal enerji, dünyanın derinliklerinde bulunan ısıdan elde edilen bir enerji türüdür. Bu ısı, yerkabuğunun oluşumu sırasında oluşun ve hala soğumamış olan magmadan kaynaklanır. Yeraltına sızan yağmur, kar ve deniz suları, bu ısıyı alarak ısınır ve gözenekli ve geğirimli kayaç katmanları arasında toplanır. Bu katmanlar, aküfer olarak adlandırılır. Aküferlerde toplanan sıcak su ve buhar, doğal olarak yeryüzüne çıkabileceği gibi, teknoloji kullanılarak da çıkarılabilir. Jeotermal enerji, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yani, sürekli olarak yenilenir ve tükenmez. Ayrıca, çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Jeotermal santrallerde, fosil yakıtların aksine, hava kirliliği ve sera gazı emisyonu gibi çevresel sorunlara neden olmaz.

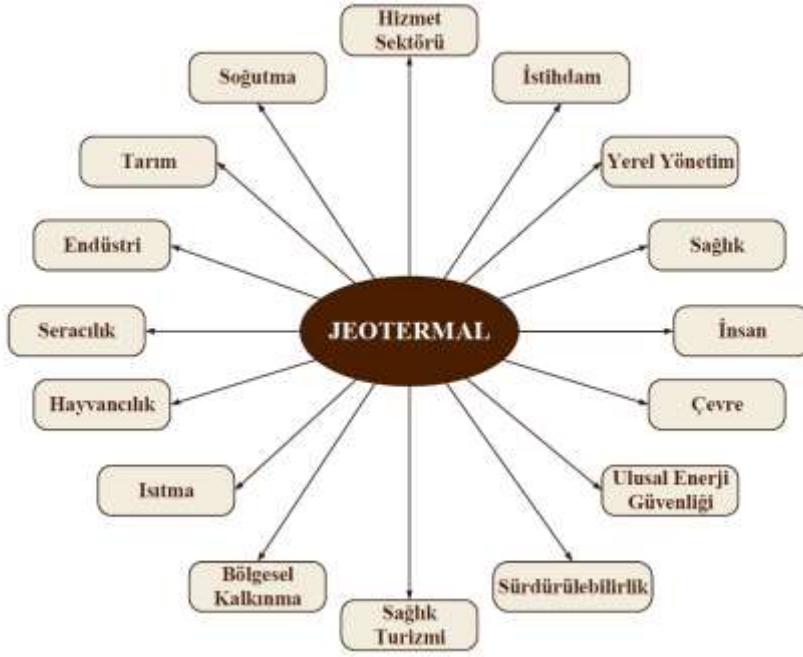
Jeotermal enerji kaynaklarının birçok faydası bulunmakla birlikte, bunların yenilenebilir olması, belirlenme ve üretiminin kolaylığı, düşük maliyeti, kısa sürede geri dđnüş sağlayan yatırımı ve diğer kaynaklara göre çevreye verdiği zararın azlığı gibi avantajları ile ön plana çıkmaktadır.

Jeotermal sistemler, “ısı kaynağı”, “rezervuar” ve/veya “hazne kaya”, “akışkan” ve “örtü kaya” olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. (şener vd., 2022)



Şekil 1.2. Jeotermal kaynak oluşumu ve kullanımı (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal enerji Şekil 1.3'te de belirtildiği gibi üretildiği bölgedeki sosyal, çevresel, ekonomik, tıbbi, bilimsel pek çok unsur ile ilişki içindedir. Fosil yakıtlara yönelik tasarlanmış kent yaşamı için bir değişim ve başlangıç maliyeti gerekse de ilişkili olduğu bu unsurlar için büyük potansiyeller barındırır. Düzenli, kaliteli enerji sağlamasıyla güvenilir bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Bu enerji, çevreye zarar vermeyen, ekonomik, temiz, yenilenebilir ve yerel bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Dünya genelinde pek çok farklı ülkede bulunan jeotermal enerji yüzyıllardır endüstriyel ısı ihtiyaçları, ısıtma, sıcak su temini, sağlık tedavileri ve kurutma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Tarihte insanlar için pek çok ayrı zamanda ve faaliyet alanında değerlendirilmiş bu kaynak her geçen gün artan enerji ihtiyacı için oldukça çevreci ve çok yönlü çözümler sunar.



Şekil 1.3. Jeotermal ile ilişkili kavramlar.

Jeotermal enerjinin ülkemize sağlayacağı avantajlar şu şekilde özetlenebilir:

- *Jeotermal çevre dostu ve temiz bir enerjidir,*
- *Jeotermal enerji ulusaldır, öz kaynağımızdır,*
- *Dışa bağımlılık söz konusu değildir,*
- *Enerji üretiminde alternatiflerine göre ucuzdur,*
- *Yerli üretim olduğundan döviz harcamalarını azaltmaktadır,*
- *Hibrit ve entegre kullanım imkânları vardır,*
- *Jeotermal enerjinin, ithal edilen enerjilerin aksine satış fiyatının belirlenmesinde uluslararası bağımlılık yoktur.*

Jeotermal enerji yalnızca kaynaktaki akışkanlara bağlı değildir. Suların bulunmadığı bazı alanlarda geliştirilebilir sistemler ve/veya kızgın kuru kaya gibi güncel tekniklerle ısısından faydalanılan bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Şener vd., 2022). Bu teknikte, yer kabuğunun derinliklerinde bulunan ve doğal olarak su içermeyen yüksek sıcaklıklı kayalar, hidrolik çatlatma yöntemiyle işlenir. Bu çatlaklar aracılığıyla su enjekte edilir. Su, kayaların içinden geçerken ısıyı emer ve buhar haline gelerek yüzeye çıkarılır. Böylece, yer

kabuğunun doğal ısısından yararlanarak temiz ve sürdürülebilir enerji elde edilmiş olur. Bu yöntem, özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde jeotermal enerji potansiyelini kullanmak için etkili bir çözüm sunar.

Jeotermal sahalar, enerji üretiminin yanı sıra doğal güzellikleri, ulaşılabilirlikleri ve ziyaretçi çeşitliliği gözetilerek, iyi bir planlama ile termal turizm merkezleri olarak geliştirilebilir ve nitelikli sağlık turizmi faaliyetleri sunabilir. 40°C'nin üzerindeki sıcaklıklara sahip bölgeler, geleneksel kaplıca tedavilerinin ötesinde, yüksek kalitede hizmet veren tesislere dönüştürülerek hem yerel hem de uluslararası turistlere hizmet verebilir. Daha düşük sıcaklıktaki jeotermal alanlarda, sıcak su kaynaklarında yetişebilen balık türleri için kültür balıkçılığı faaliyetleri ekonomik bir fırsat yaratabilir. Ayrıca, seracılıkta kullanılmak üzere düşük sıcaklıklı jeotermal kaynakların avantajları da ekonomik değer taşımaktadır.

1.3.1 Jeotermal kullanım alanları

Yer kabuğunun derinliklerinde bulunan bu değerli kaynağın kullanımı insanlığın çok eski zamanlarına kadar uzanmaktadır. Yüzyıllar boyu sağlık, dinlenme, temizlenme ve ısınma amaçlı kullanılan jeotermal 21.yy'a gelindiğinde bambaşka potansiyellerini ve kullanım alanlarını da göstermiştir. Jeotermal kaynakların kullanım alanları, artan teknolojik faaliyetler ile birlikte günümüzde oldukça genişlemiş ve çeşitlenmiştir. (Tablo 1.4.) Jeotermal kaynaklardan genellikle ya doğrudan kullanım, ya da elektrik üretimi biçiminde yararlanılmaktadır ancak kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir. Teknolojinin de gelişmesi ve enerjiye olan ihtiyacın armasıyla birlikte jeotermal enerjinin kullanım alanlarını artıracak araştırmalar ve faaliyetler de çoğalmaktadır.

Tablo 1.4. Jeotermal kaynak sıcaklığına göre uygulama alanları (Dinçer ve Ezan, 2020).

20°C – 50°C	50°C – 80°C	80°C – 120°C	120°C – 160°C	160°C – 220°C	> 220°C
<ul style="list-style-type: none"> Balık yetiştiriciliği Yüzme havuzu Kaplıca Fermentasyon Su ürünleri yetiştiriciliği Toprak ısıtması Mantar yetiştiriciliği Isı pompaları 	<ul style="list-style-type: none"> Konut ısıtma Hava kurutma Sera ısıtma Tahıl kurutma Meyve kurutma Sebzeye kurutma 	<ul style="list-style-type: none"> Temiz su eldesi Gıda kurutma Deni ve kürk işleme Tekstil ürünlerinin yıkama ve boyama işlemleri Kağıt işleme 	<ul style="list-style-type: none"> Flaş çevrimler Konut soğutma Direkt buhar eldesi Damıtma yoluyla temiz su eldesi Şeker rafine işleminde buharlaşma Endüstriyel iklimlendirme 	<ul style="list-style-type: none"> İkili (binary) çevrimler Kalina çevrimi Yüksek kapasitede çiftlik ürünlerinin kurutulması Gıda ürünlerinin konservelenmesi Amonyaklı absorpsiyon soğutma Kimyasal üretim 	<ul style="list-style-type: none"> Hidrojen üretimi Alternatif yakıt üretimi Konvansiyonel güç üretimi Kojenerasyon

1.3.1.1 Elektrik üretimi

Jeotermal enerjiden elektrik üretimi sırasında farklı türde santraller kullanılabilir. Bu işlem yeraltı kaynaklarından elde edilen sıcak su ve buhar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemidir. Jeotermal santrallerde, yeraltından çıkarılan sıcak su ve buhar, bir türbinin dönmesini sağlar. Türbinin dönmesi ile birlikte, bir jeneratör elektrik enerjisi üretir.

Elektrik üretimi hâlihazırda ekonomik kalkınma, refah düzeyinin artması, üretimde sürdürülebilirlik gibi konularda ülkelerin en önemli ihtiyaçlarından olmasının yanı sıra her geçen gün daha da dijitalleşen dünyada güvenlik gibi konularda da vaz geçilmez bir enerji haline gelmiştir. Bu nedenlerle öz ve doğal kaynaklarımızla elektrik üretebilmek oldukça değerlidir. Öte yandan elektrik üretimi için jeotermal kaynağın entalpisinin yüksek olması gerekmektedir. Yüksek entalpili jeotermal kaynaklar, sıcaklığı 150 °C'nin üzerinde olan kaynaklardır. Sahip olduğumuz jeotermal kaynaklar içerisinde yaklaşık olarak %10'u elektrik üretimi için uygundur. Dünyada ise jeotermal enerjiden elektrik üretimi konusunda başı çeken ülke ABD'dir. Onu Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda izlemektedir (MTA, 2024).

1.3.1.2 Doğrudan kullanım

Türkiye'nin jeotermal sahalarının büyük bir kısmı doğrudan kullanımlar için tutarlı ve yerel olarak bulunabilirlikleri nedeniyle büyük bir avantaj sağlamaktadır. Türkiye'de kurulu doğrudan kullanım jeotermal kapasitesi 5113 MWt olarak

hesaplanmıştır. Bu değerin yaklaşık olarak %47,8'ini termal turizm faaliyetleri, %27,8'ini merkezi ısıtma uygulamaları, %24,1'ini sera ısıtma uygulamaları ve %0,4'lük kısım ise ısı pompaları, kurutma ve soğutma uygulamaları oluşturmaktadır (Şener vd., 2022).

Sahip olduğumuz jeotermal kaynakların yaklaşık olarak %90'ı düşük ve orta entalpili kaynaklardır ve doğrudan kullanım için uygundur. Dünyada ise jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında öne çıkan ilk beş ülke ABD, Çin, İsveç, Türkiye ve Almanya şeklindedir (MTA, 2024).

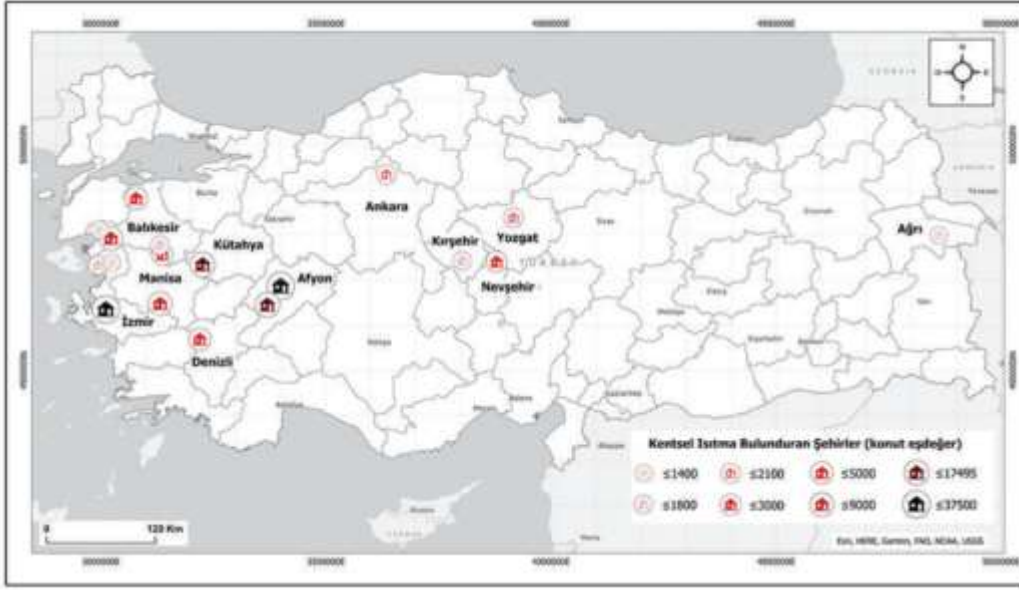
Kentsel ısıtma ve soğutma

Sıcaklık değeri 40 °C ve üzerinde olan jeotermal sular, konutları, binaları ve kentleri merkezi sistemle ısıtmada, cadde, havaalanı pistlerinin ısıtılmasında, alışveriş merkezleri gibi sosyal alanların ısıtılmasında kullanılabilir. İnsanın var oluşundan bu yana barınma ihtiyacı içerisinde çok önemli bir yer kaplayan ısınma için çevre dostu, sürekli ve çağdaş çözümler barındırmaktadır.

Enerji Kentleri Birliği (EKB, 2022) verilerine göre şehirler ve ticari binalar/tesisler için ısıtma sistemleri bugün Türkiye'de doğrudan jeotermal enerjinin en yaygın kullanım şeklidir.

Jeotermal ile ilk ısıtma 1984 yılında Balçova jeotermal kaynakları ile gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, 2018 senesinde İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş. tarafından 1900 m² kapalı alanın soğutulması için Balçova'da ilk jeotermal soğutma faaliyetleri hayata geçirilmiştir (Şener ve ark 2022).

Türkiye'de jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma yapılan şehirler ve konut eşdeğerleri Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Türkiye’de jeotermal kaynaklı merkezi ısıtma yapılan şehirler ve konut eşdeğerleri (Şener ve ark., 2022).

Termal sağlık turizmi

Termal sağlık ve yıkanma/banyo ihtiyaçları için jeotermal akışkanın doğrudan kullanılması, geçmişten günümüze devam eden bir uygulamadır. Türkiye, termal turizm alanında, hem iç hem de dış turistleri otel, kaplıca ve dinlenme alanlarına çekerek bu sektörü geliştirmiş ve çağa uygun hizmetler sunmaktadır.

Türkiye’nin jeotermal kaynaklarını doğrudan kullanarak sağlık turizmi (balneoloji) alanında ileride büyük bir gelişme gösterebileceği, kaplıca tesislerinin potansiyel bir büyüme bölgesi olduğu öngörülmektedir. Avrupa’da, Orta Doğu’da Asya’da pek çok jeotermal kaynağın bulunduğu ülkede termal sağlık kentleri bulunmaktadır. Termal sağlık turizmi konusunda en çok bilinen ülkeler arasında ülkemizin yanı sıra ABD, Almanya, Tayland ve Hindistan yer almaktadır.

50 °C sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar, Çin, Japonya ve Yeni Zelanda gibi bazı ülkelerde tansiyon, romatizma, sinir ve cilt hastalıkları tedavilerinde kullanılmaktadır. Almanya, Avusturya, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, Slovakya ve Polonya’da toplamda yaklaşık 350 termal sağlık şehri mevcuttur. Bu ülkelere ek olarak, Fransa ve İtalya gibi ülkelerde termal kür şehirlerine ek olarak deniz

kıyısında yer alan onlarca kür şehri bulunmaktadır. (Almanya 230, Avusturya 80, Çekya 15, Macaristan 10, Slovakya 10 ve Polonya 10) (Şener ve ark 2022)

Ülkemizde termal yüzme havuzu, termal tedavi imkânı ve diğer amaçlarla termal turizm tesisi bulunan şehirler Şekil 1.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Sağlık Bakanlığı'na göre (2021), Türkiye'de termal turizm tesisi, kaplıca bulunduran şehirler ve yaklaşık tesis sayıları (Şener ve ark., 2022).

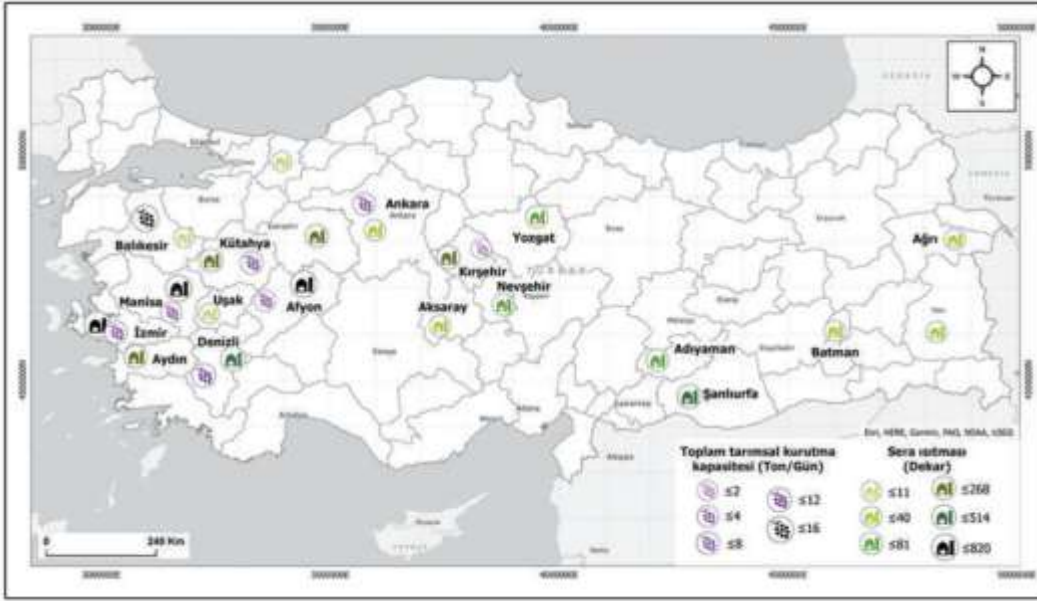
Sera ısıtma ve tarımsal kurutma

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nde belirlendiği gibi sürdürülebilir gıda üretimi, yıl boyunca artan gıda, sebze ve meyve talebini karşılamak için dünya çapında hayati önem taşımaktadır.

Türkiye, Çin, Rusya Federasyonu, Macaristan ve İtalya gibi ülkelerin öne çıktığı birçok ülke günümüzde zirai üretimde kıymetli bir potansiyele sahip olan sera ısıtmasında jeotermal kaynaklardan yararlanmaktadır (Şener ve ark 2022).

Tarım ürünlerinin kurutulma işlemi, gıda israfını önlemek ve hasat dönemi dışında da besinlere erişebilmek amacıyla uzun süredir tercih edilen bir yöntemdir. Gıda muhafazası için kritik bir teknik olan kurutma, günümüzde de popülerliğini korumaktadır. 150 °C altındaki sıcaklıklarla düşük ve orta entalpi seviyelerine sahip jeotermal kaynaklar, tarımsal kurutma için ideal sıcaklık aralığını sunarak bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Jeotermal enerji, pirinç, buğday, domates, soğan, pamuk, biber ve sarımsak gibi çeşitli zirai ürünlerin kurutulmasında etkin bir rol oynamaktadır.

Şekil 1.6.'da sera ısıtılması yapılarak turfanda sebzeçilik, meyvecilik, çiçekçilik üretimi, yiyeceklerin kurutulması ve sterilize edilmesi alanlarında faaliyet gösterilen şehirler gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Türkiye'deki mevcut jeotermal sera ısıtma ve kurutma uygulamaları (Şener ve ark., 2022).

Yer kaynaklı ısı pompası

Enerji depolama teknolojileri, enerji verimliliğini artırma ve fosil yakıtların kullanımını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu teknolojiler, enerjiyi daha uzun süreler boyunca saklayarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalanmalarını dengelemekte ve enerji güvenliğini artırmaktadır. Dünya genelinde pek çok ülke, ısı enerjisi depolama

sistemleri ve yer kaynaklı ısı pompası teknolojileri gibi yenilikçi çözümler üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu uygulamalar, özellikle binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmakta ve enerji tüketimini azaltarak çevresel etkiyi minimize etmektedir. Bu sayede, sürdürülebilir bir enerji geleceği için kritik adımlar atılmaktadır.

Hepbaşı vd.ye göre (2001) yer kaynaklı ısı pompası sistemleri 2000'li yılların başlarında villa tipi uygulamalar ile başlamıştır. Mertoğlu vd.ye göre (2021) son zamanlarda alışveriş merkezleri, otel, ofis, okul ve kamu binalarında da uygulama sayısı giderek artmıştır. Günümüzde ise yer kaynaklı ısı pompası kullanımını 8,5 MWt ulaşmıştır (Şener vd., 2022).

Entegre sistemler

Jeotermal kaynakların entegre sistemler ile kullanımı, jeotermal enerjinin farklı amaçlar için bir arada ve verimli bir şekilde kullanılmasını ifade eder. Örneğin, bir jeotermal kaynaktan elde edilen sıcak su, önce elektrik üretiminde kullanılabilir, ardından artık ısı ile seralar ısıtılabilir ve son olarak da balık çiftliklerinde su ısıtmak için kullanılabilir. Bu tür bir sistem, enerjiyi maksimize etmek ve kaynakları en verimli şekilde kullanmak için tasarlanmıştır.

Jeotermal enerjinin entegre kullanımı, Türkiye'de yerel ekonomiyi canlandırma ve toplumun ihtiyaç duyduğu hizmetleri sağlama yolunda önemli bir adımdır. Bu yaklaşım, jeotermal kaynakların çeşitli uygulamalar arasında paylaşılmasını ve böylece enerji verimliliğinin artırılmasını, çevresel etkilerin azaltılmasını sağlar. Ayrıca, yöre halkının jeotermal enerjinin olası çevresel etkilerinden korunmasına, istihdam olanaklarının artmasına ve jeotermal enerjinin önemine dair farkındalığın yükselmesine katkıda bulunur. Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden bu entegre sistemler, Türkiye'nin enerji alanındaki geleceğini şekillendirmede kilit rol oynayabilecek niteliktedir.

Rubio-Maya vd.ye göre (2015) jeotermal kaynakların entegre (kademeli) kullanımı, elektrik üretimi, termal enerjinin dağıtımı ve kullanımı, kurutma ve

dehidrasyon süreçleri, rekreasyonel kullanımlar ve jeotermal ısının diğer herhangi bir doğrudan kullanımı için farklı teknolojileri entegre ederek jeotermal ısının sıralı bir şekilde uygulamalarda kullanılması olarak tanımlanır (Şener vd., 2022).

Jeotermal enerji ile entegre olabilecek sistemlere örnekler;

Güneş enerjisi: Güneş ve jeotermal enerji, birbirini tamamlayan özellikler gösterir. Güneş enerjisi, gündüzleri yüksek üretim sağlarken, jeotermal enerji, gündüz ve gece boyunca üretim yapabilir. Bu sayede, entegre santraller, daha istikrarlı bir enerji üretimi sağlar.

Rüzgar enerjisi: Rüzgar ve jeotermal enerji, yine birbirini tamamlayan özellikler gösterir. Rüzgar enerjisi, gündüz ve gece boyunca üretim yapabilirken, jeotermal enerji, daha düşük maliyetli bir enerji kaynağıdır. Bu sayede, entegre santraller, daha ekonomik bir enerji üretimi sağlar.

Biyokütle enerjisi: Biyokütle enerjisi, jeotermal enerji ile entegre edilerek, daha düşük maliyetli ve çevre dostu bir enerji üretimi sağlanabilir. Örneğin, biyokütle enerjisi ile üretilen elektrik, jeotermal enerji ile ısıtılan seraları aydınlatmak için kullanılabilir.

Hidroelektrik enerjisi: Hidroelektrik enerjisi, jeotermal enerji ile entegre edilerek, daha ucuz ve çevre dostu bir enerji üretimi sağlanabilir. Örneğin, jeotermal enerji ile üretilen elektrik, hidroelektrik santrallerini çalıştırmak için kullanılabilir.

Jeotermal enerji, ayrıca, aşağıdaki gibi doğrudan kullanımlar için de entegre edilebilir:

Sera ısıtması: Jeotermal enerjinin ısı enerjisi, seraları ısıtmak için kullanılabilir. Bu sayede, seracılık faaliyetlerinde kullanılan enerji maliyetleri düşürülür.

Isıtma: Jeotermal enerjinin ısı enerjisi, binaları, fabrikaları ve diğer tesisleri ısıtmak için kullanılabilir. Bu sayede, enerji maliyetleri düşürülebilir ve çevresel etkiler azaltılabilir.

Sanayi süreçleri: Jeotermal enerjinin ısı enerjisi, sanayi süreçlerinde kullanılabilir. Bu sayede, enerji maliyetleri düşürülebilir ve çevresel etkiler azaltılabilir.

1.3.1.3 Diğer kullanım

Elektrik üretimi ve doğrudan kullanımların yanı sıra kimyasal madde üretimi, kuru buz, deri kurutma ve işleme, dokuma ve boyamacılık, tropikal yetiştiricilik, kâğıt ve kerestecilik, ısı pompası (toprak ve kuyu kaynaklı) gibi diğer kullanımlarda da jeotermal enerjiden yararlanılabilmektedir.

Jeotermal akışkanlar, ekonomik değeri yüksek olan lityum, bor, potasyum ve diğer birçok minerali içeren sıcak ve yoğun çözeltiler şeklinde bulunur. Bu kaynaklar, jeotermal enerji alanlarının derinliklerindeki aşırı sıcaklıklara maruz kalan kayalar arasında hareket eder. Jeotermal akışkanlardan, hidrojenin yanı sıra karbondioksit (CO₂), potasyum klorür (KCl), lityum klorür (LiCl), silikon dioksit (SiO₂), çinko (Zn), magnezyum (Mg), mangan (Mn), bor (B), potasyum (K), kurşun (Pb), bakır (Cu), gümüş (Ag), gibi ticari olarak değerli minerallerin çıkarılması da mümkündür.

Yıldız'a göre (2020), akışkanlardan kimyasal kazanımı faaliyetlerinde izlenen yöntem kazanılmak istenen kimyasala göre farklılık göstermektedir. Jeotermal akışkanlar içerisinde sık rastlanan silisyumun kazanımı, lastik, seramik, plastik, çimento kağıt, kozmetik, zirai ilaçlar ve yapıştırıcı endüstrilerindeki faaliyetler açısından önemlidir. Jeotermal sularda en yaygın görülen elementlerden bir başkası da lityumdur. Cam, seramik, alüminyum ile şarj edilebilir pillerin üretiminde kullanılan lityum jeotermal akışkanlardan ya direkt olarak lityum tuzları biçiminde çökeltmeyle ya da iyon dönüştürücü reçineler kullanılarak elde edilmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Ülkemizde sıvı CO₂ üretimi konusundaki çalışmalar başlangıçta Denizli-Kızıldere sahasında uygulanmış ve hala üretime devam edilmektedir (Şener vd., 2022).

ABD, Çin, Almanya, Güney Kore ve Güney Afrika gibi ülkeler, enerji üretiminde hidrojeni aktif olarak kullanmaktadırlar. Hidrojen, elektroliz işlemiyle elde edilebileceği gibi doğalgaz, kömür, hidrokarbonlar, metanol, LPG, nafta ve benzin gibi kaynaklardan da üretilebilir; fakat bu yöntemler hava kirliliğine yol açabilir. Bu sebeple, jeotermal enerji kullanılarak hidrojen üretimi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ayrıca, bahsi geçen ülkelerde hidrojenle çalışan trenler ve otomobiller zaten mevcuttur ve kullanılmaktadır.



2. LİTERATÜR BİLDİRİŞLERİ

Erkul (2012) yaptığı çalışmada insanların yaşamsal etkinlikleri için doğayı sıklıkla ve sürekli biçimde kirlettiklerine ve çevreye olan bu olumsuz etkinin en fazla enerji üretimi ve kullanımı alanında olduğuna dikkat çekmiştir. Jeotermal enerji, fosil yakıtların yerine kullanılarak sera gazı emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Jeotermal kaynakların çağdaş, sürdürülebilir, bilimsel ve verimli şekilde kullanılması, enerjide dışa bağımlılığı azaltarak, enerji güvenliğini artırarak, çevre kirliliğini azaltarak ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyerek, dünyamızın geleceği için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Kagel et al. (2005), ABD’de kullanılan jeotermal enerji ve çevre ilişkisini inceledikleri çalışmada, jeotermal enerjinin güvenilir, yenilenebilir bir enerji kaynağı olduğunu ortaya koymuş, aynı zamanda jeotermal enerjinin, diğer enerji teknolojilerine oranla çevresel etkilerinin daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Benzer şekilde Nakahara et al. (1978), jeotermal atık suların civar nehir sistemlerindeki çevresel etkilerini inceledikleri çalışmada, bu atık suların nehir üzerindeki etkisinin ciddi boyutlarda olmadığını ortaya koymuşlardır.

Baba and Armannsson (2020), jeotermal alanların kullanımının çevresel etkilerini araştırdıkları çalışmada, yukarıdaki araştırmalara karşıt sonuçlara ulaşarak, Türkiye’nin çeşitli bölgelerinden elde ettikleri verilerle toprak ve suda termal sulardaki yüksek mineralizasyona bağlı etkilerin oluştuğunu ortaya koymuşlardır.

Sowizdal et al. (2019), jeotermal suların Polonya’daki çevresel etkilerini inceledikleri çalışmada, oluşabilecek zararlı çevresel etkilerin teknolojik hatalarla sınırlı olduğunu ve genellikle kısa süreli olduğunu belirterek, jeotermal suların ve jeotermal enerji kullanımının herhangi bir bölgede yaşam koşullarını belirgin bir biçimde geliştirdiğini ifade etmektedir.

Hunt (2000), jeotermal enerjinin olumsuz çevresel etkilerini minimuma indirebilmek için dikkatli planlamanın, ekipmanların sessizleştirilmesinin, rezervuar basınçlarını korumanın, atık akışkanların derine yeniden enjekte

edilmesinin önemini vurgularken, re-enjeksiyon basınçlarını minimize etmenin küçük depremleri tetiklemenin de önüne geçebileceğini işaret etmektedir.

Armannsson and Kristmannsdottir (1992), zararlı endüstriyel etkilerin azaltılması için jeotermal enerjinin hangi biçimlerde kullanılabileceğini ortaya koymayı amaçladıkları çalışmada, muhtemel çevresel etkilerin büyük ölçüde öngörülebilir olduğunu ve bunların etkilerinin minimuma düşürülebilmesi için önlemler alınabileceğini, öngörülemeyen etkilerin ise izleme programlarıyla belli sınırlar içinde tutulabileceğini işaret etmişlerdir.

Şimşek ve Gündüz (2017)'e göre Jeotermal sular, çevre dostu olarak bilinmekle birlikte, kimyasal özellikleri sebebiyle içme ve sulama suyu kaynaklarını kirletebilir. Bu nedenle, jeotermal akışkanların içme ve sulama suyu kaynaklarına karışmasını engellemek öncelikli bir gerekliliktir. Bunun için, kaynağın bulunduğu sahaya ait jeolojik yapının detaylıca incelendiği jeolojik araştırma ve çalışmaların yapılması, kayaçların mühendislik ve hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi ve jeolojik yapıya uygun şekilde kuyu planlarının oluşturulması gerekmektedir. Jeotermal kuyular, tıpkı barajlar, tüneller ve diğer mühendislik projeleri gibi, kapsamlı bir planlama ve tasarım gerektirir. Bu planlamada, deprem ve diğer doğal ve insan kaynaklı riskler göz önünde bulundurulmalıdır. Önlemlere rağmen jeotermal sahaların gözlem kuyuları ile izlenmesi, üretim ve/veya re-enjeksiyon kuyularından meydana gelebilecek kaçakları ve yeraltı suyuna olan olası karışımları tespit etmek için gereklidir.

Poyraz (2016) Jeotermal enerji üretimi için yüzeye çıkarılan akışkanların sulama sularına ve toprağa teması nedeniyle kirlenme riski taşıyan Aydın-Buharkent yöresinde çalışma yapmıştır. Bu çalışmada bölgedeki toprağın ve tarımsal ürünlerin ağır metal seviyelerinin tespit edilmesi amacıyla yaptığı analizlerde, kirlenme ihtimalinin yüksek olduğu düşünülen tesislerin çevresinden 9 toprak, 5 meyve istasyonu belirlenmiştir. Araştırma için seçilen istasyonlardan, üç aylık periyotlarla toplamda üç kere topraktan ve meyvelerden örnekler alınmış ve temel kirlilik parametrelerine ait analizler yapılmıştır. Örneklerin tuzluluk, pH ve iletkenlik gibi göstergeleri incelenmiş, ardından çeşitli elementlerin (B, Cd²⁺, Cr³⁺, Pb²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Al³⁺, Mn²⁺, Fe³⁺) analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın

sonunda elde edilen sonuçta jeotermal enerji üretim tesislerinin çevresinde pH, tuzluluk ve bor derişimi yüksek olarak saptanmıştır. Ayrıca bütün istasyonlarda Cd, Cr, Mn, Cu tayin limitinin altında tespit edilirken, Zn bir istasyon hariç bütün istasyonlar için yüksek çıkmıştır. Fe ve Al derişimleri ise bütün istasyonlarda yüksek olarak ölçülmüştür.

Bundschuh et al. (2013), Türkiye'nin Batı Anadolu bölgesinde yer alan jeotermal sistemlerde doğal olarak meydana gelen arseniği inceledikleri çalışmada, içme suyu kaynaklarına karışan jeotermal suların oluşturduğu tehlikeye dikkat çekerek, düzgün yönetim ve kontrol stratejilerinin önemine dikkat çekmiştir.

Rabet et al. (2017) de, yukarıdaki çalışmaya benzer bir biçimde, jeotermal akışkanların genellikle arsenik, boron gibi toksik kimyasallar barındırdığını gözlemlemiştir ve her ne kadar jeotermal sular yenilenebilir enerji kaynakları olsalar da, jeotermal kuyu açma süreçlerinde dikkatli araştırma ve değerlendirmelerin yapılmasının ve çevresel risklerin düzgün bir biçimde sorgulanmasının önemini vurgulamıştır.

Baba and Armannson'a göre (2006), Jeotermal enerji, iyi ve çevreci mühendislik teknik ve teknolojilerinin kullanılmasına bağlı olarak, kirletici etkisi olmayan, sürdürülebilir, yenilenebilir, ekonomik, güvenilir, temiz, 24 saat kullanılabilen ve ulusa bir enerji kaynağıdır. (Şener vd., 2022).

Çermikli (2020), jeotermal suların ıslahı için yapılabilecek uygulamaları araştırdığı çalışmasında, bir şirketin Balçova'da yer alan kuyularından alınan sudan bor ve arseniğin giderilmesi için membran temelli yeni hibrit ayırma süreçlerinin etkisini incelemiştir.

Pamir'e göre (2006), global ölçekte kullanılan enerjinin ortalama olarak %39 kadarını petrol, %27 kadarını kömür ve %21 kadarını doğalgaz, %13 kadarını ise hidroelektrik ve yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. Yine Pamir'e göre (2003), bu değerlerden hareketle, küresel olarak harcanan enerjinin %87'si fosil yakıtlardır. Araştırmacıların tahminlerince petrol rezervlerinin tahmini 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 62 yıl ömrü kalmıştır (Erkul, 2012). Bu çalışmalar ışında

yenilenebilir enerji kaynaklarını doğa dostu yöntemlerle uygulamanın önemi bir kat daha artmıştır.

Çetin ve Tarcan (2023) yaptıkları çalışmada jeotermal akışkan madenciliğinin önemini aktarmıştır. Jeotermal akışkanların içerisindeki minerallerin ayrıştırılması 1800'lü yıllardan beri uygulamada ve geliştirilmekte olan bir konu olmakla beraber batı Anadolu'da bulunan jeotermal sistemler dünya üzerinde bulunan örneklerine göre oldukça düşük değerlerde metalik içeriğe sahip olmasına karşın son 10 yılda enerjiye yönelik jeotermal akışkan üretimi oldukça artmıştır. Su - kayaç etkileşimi sonrasında maden niteliği taşıyan minerallerce zenginleşen jeotermal sular; elektrik enerjisi, ısı enerjisi, turizm, endüstriyel karbondioksit üretimi gibi getiriler sunmaktadır.

Yanar (2015), Ege Bölgesi'ndeki jeotermal akışkanlarda bor, lityum ve arsenik düzeylerini incelemiştir. Araştırmada, Aydın şehrinin Morali bölgesinde 2 ayrı jeotermal sahaya ait alınmış su örnekleri kullanılmıştır. Numunelerin lityum, bor ve arsenik konsantrasyonları incelenmiş ve bu elementlerin kazanımlarına yönelik analiz oluşturmuştur. Jeotermal akışkanlardan kimyasal kazanım, özellikle de bor ve lityum kazanımı ekonomik olarak oldukça önemlidir.

Özbey Ünal (2019), jeotermal akışkanlardan bor eliminasyonu için yenilikçi hidrofobik membran distilasyonu membranları üretmek ve sistem geliştirmek amacıyla yaptığı çalışmada jeotermal santrallerde çeşitli nedenlerle re-enjekte edilemeyen jeotermal akışkanların çevresel kirliliğe neden olmadan başka alıcı ortamlara deşarj edilebilecek niteliğe gelmesi için çalışmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Çiftçi ve Meriç (2020), jeotermal sularda lityum oluşumunu ve geri kazanımını inceledikleri bir çalışmada, lityumun geri eldesi için teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir, ekolojik ve sürdürülebilir bir proses oluşturmaya odaklanmışlardır. Çalışmada, jeotermal sulardan lityum geri kazanımı için iyon elek, adsorpsiyon, kimyasal çöktme, membranlar, elektrodializ gibi çeşitli tekniklere denenmiş ve lityumu geri kazanmak için bu teknolojiler arasında elektrodializin tek başına veya membranlarla bütünleşik şekilde kullanılmasının

avantajlarını görmüşlerdir. Çalışmanın bulguları, jeotermal suların, lityum üretimi için önemli bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

Güler ve Çobanoğlu'na göre (1997), Alp-Himalaya dağ kuşağı üzerinde yer aldığı bilinen ülkemizde, genç tektonik yapıya bağlı aktif kırıklar (faylar) olmasının, volkanlara, hidrotermal ayrılmış bölgeler ile 1500 dolayındaki sıcak ve mineraller içeren kaynaklara sahip olması, Türkiye'nin önemli bir jeotermal enerji potansiyelinin olduğunun göstergesidir. Yine genç tektonik hareketler sonucu olarak oluşan çöküntüler (grabenler), yaygın volkanizma, doğal buhar ve gaz çıkışları ve hidrotermal alterasyonun olması ülkemizin dikkate değer bir jeotermal enerji potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Şener vd. (2022) yaptığı çalışma da bu potansiyeli destekler niteliktedir. Önemli jeotermal sistemleri barındıran Türkiye'nin, sıcaklığı 30 °C ve üzerinde olan 415 adet jeotermal alanıyla epey zengin jeotermal kaynak kapasitesine ve ekonomik potansiyele sahip bir ülke olduğu ortaya konmuştur. Çalışmanın yapıldığı tarihte elde edilen veriler ışığında (kızgın kuru kaya potansiyeli dâhil edilmeden) toplam potansiyelin 62.000 MWt düzeyine ulaşabileceği ön görülmektedir.

Rybach (2023), jeotermal kaynakların fosil yakıt rezervlerinin oluşması için ihtiyaç duyulan süreye ihtiyaç duymayan yenilenebilir kaynaklar olduğunu belirtirken, çevresel etkilerin küçük, kontrol edilebilir veya görmezden gelinebilir olduğunu işaret etmektedir. Ancak bunu söylerken ülkeden ülkeye değişebilen çevresel yasal düzenlemelere uyulması gerektiğini, ortaya çıkabilecek etkilerin gözlenmesi, belgelenmesi, derecelendirilmesi ve eğer gerekliyse azaltılması zorunluluğunu da ihmal etmemektedir.

Child et al. (2019)'a göre günümüzde küresel enerji kapasitesinin üçte birinden fazlasını yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. Son yıllarda enerji ihtiyacının %100'ünü yenilenebilir kaynaklardan elde etme amacıyla yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Çin, Norveç, Almanya, Kosta Rika ve İsveç gibi ülkeler ulusal enerji çalışmalarının hedeflerini “%100 yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş şeklinde planlamışlardır. Karabağ ve ark. (2021), ülkemizin enerji üretiminde de yenilenebilir enerji kaynaklarını etkisinin gün geçtikçe arttığını ortaya koymuşlardır. 21 yüzyıla girişimizle birlikte planlama ve uygulamalardaki

artış değerlendirildiğinde 2008 yılında yenilenebilir enerjinin üretimdeki payı %19,58 iken 2018’de bu pay %32,08 olmuştur. Fosil yakıt kaynaklı enerji üretimi için bu sayılar 2008’de %82,06’yı gösterirken 2018’de %67,60’a düşmüştür. Bu veriler ülkemizde de %100 yenilenebilir enerji kullanımına geçişte önemli aşamalar kaydedildiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerjilerden biri olan jeotermal enerjinin de doğru uygulamalarla ülkenin kalkınmasında önemli bir yer alabileceği öngörülmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması için öncelikle yurt içi ve yurt dışında jeotermal sularla ilgili yapılan çalışmalar taranmıştır. Makale, kitap, dergi, yüksek lisans/doktora tezi, kongre gibi bilimsel çalışmalar, jeotermal suların yarattığı çevresel etkilere yönelik yapılmış haberler, konuya yönelik bilgiler paylaşan internet siteleri ve yönetmelikler araştırmanın materyallerini oluşturmaktadır. Bu kaynaklardan İngilizce olanlar çalışma esnasında Türkçeye çevrilmiştir.

Güncel istatistikler, güncel küresel işbirlikleri, pilot aşamadaki projeler gibi toplanan tüm bilgiler ışığında değerlendirmeler yapılmış ve jeotermal suların çevresel etkileri ortaya koyulmuştur. Jeotermal suların ve bu sulardan elde edilen enerjinin çevresel etkileri konusuna hem olumlu etkiler hem de riskler ele alınmıştır. Olumlu etkilerin pekiştirilmesi, risklerinin minimize edilmesi hususunda öneriler sunulmuştur.

4. JEOTERMAL ENERJİNİN ÖNEMİ VE TARİHÇESİ

4.1 Tarihçe

Arkeolojik bulgular, Kuzey Amerika yerlilerinin jeotermal kaynakları binyıllar önce kullandığını kanıtlamaktadır. Sioux ve Cheyenne kabilelerinin savaş alanı olarak nitelendirilebilecek olan South Dakota bölgesi kaplıcalarında kayalara oyulmuş küvetler, bu suların terapötik banyo amacıyla kullanıldığını gösterir. Ayrıca bu kaplıca sularını mide-bağırsak bölgesi sağlık sorunlarını iyileştirmek için içmişlerdir. Daha sonraları, beyaz yerleşimciler kaplıcaları balneolojik amaçlarla ticarileştirmiştir.

Günümüzde halen kullanılmakta olan kaplıcaların birçoğunun çevresinde tarihi hamam kalıntılarına rastlanmaktadır. (Şener vd., 2022) Romalılar, Japonlar, Türkler, İzlandalılar ve aynı zamanda Yeni Zelandalıların yazdığı tarihi belgelerde de kaplıcaların yemek pişirme, banyo ve ev ısıtması için kullandığına ilişkin açıklamalara rastlamak mümkündür.

Yaklaşık üç bin yıl kadar önce, Antik Yunan medeniyetinde tanrıların termal ve mineral sularla ve onların şifalandırıcı gücüyle ilişkilendirildiği de bilinmektedir. Ayrıca Keltlerin ve Romalıların Kıta Avrupası'nda kaplıcalardan büyük ölçüde faydalandığı görülmektedir (Stober and Bucher, 2013).

Jeotermal enerjinin yukarıda belirtilen çeşitli amaç ve biçimlerde aktif bir şekilde kullanıldığı bilinse de, termal sulardan enerji elde etme serüveninin, termodinamikteki gelişmelerle bağlantılı bir şekilde 19. yüzyılın ikinci yarısından önce başladığı tam olarak söylenemez. Termodinamik, sıcak buharın etkin bir biçimde mekanik enerjiye, oradan da türbinler ve jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesine yardımcı olmuştur (Stober and Bucher, 2013).

İnsanlık tarihi boyunca etkilerini gördüğümüz bu şifalı, çevreci ve doğal kaynak, en önce temizlenme ve ısınma amacıyla kullanılmış, 1900'lü yılların başında pistonlu buhar makinası aracılığıyla elektrik üretmeye başlanmıştır. (Dinçer ve Ezan, 2020)

1904 yılında İtalya'da Larderello'da doğal buhardan ilk elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir (Canik vd. 2000). Larderello enerji santrali 1913'te çalışmaya başladığında, 250 kW'lık bir elektrik enerjisine sahiptir. 1939 yılına gelindiğinde Larderello enerji santrallerindeki enerji 66 MW'a ulaşmıştır (Stober and Bucher, 2013). İtalya'nın sadece bu bölgesinde 1952'de üretilen toplam elektrik enerjisinin %6'sı jeotermal enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Larderello'da elde edilen bu sonuç, ülkenin diğer bölgelerinde de bu sanayiinin kurulmasına sebep olmuştur (Sür, 1970). 1920'lerde İzlanda'nın Reykjavik şehrinde, termal suların evleri ve seraları ısıtmak için geniş ölçüde kullanıldığı görülmektedir. (Stober and Bucher, 2013). İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra birçok ülke, diğer enerji biçimlerine kıyasla ekonomik olarak daha avantajlı olduğunu düşünerek jeotermal enerji kullanımına yönelmiştir (Dickson and Fanelli, 1995). 1949'da Yeni Zelanda'da Wairakei sahasında, 1960'da Amerika'da, 1961'de Meksika'da, 1966'da Japonya'da, 1975'te İzlanda'da jeotermal enerji kaynakları elektrik üretimi için kullanılmaya başlanmıştır (Canik vd. 2000).

Tablo 4.1'de jeotermal enerjinin tarihsel gelişimi detaylı ve kronolojik şekilde paylaşılmıştır. 1800'lere kadar jeotermal kaynakların doğrudan kullanımına yönelik gelişmeler görürken, 19.yy ile birlikte rezervlerin keşfinde artışlar olduğu, 1900'lerin başlarında ise elektrik üretimi için jeotermal enerji kullanımının başladığı görülmektedir. 20.yy'ın ortalarından itibaren artık jeotermal enerjinin taşıdığı potansiyeller daha iyi anlaşılmaya başlanmış, küresel ölçekte daha da yaygınlaşmıştır.

Tablo 4.1. Jeotermal enerjinin tarihsel gelişimi (Şener vd., 2022).

M.Ö.10000	Akdeniz Bölgesi'nde çanak, çömlek, cam, tekstil, krem imalatında kullanım
M.Ö.1500	Romalılarda ve Çinlilerde banyo, ısınma ve pişirme için kullanım
630	Japon İmparatorluğu'nda kaplıca kullanımı
1200	Jeotermal enerjinin mekân ve su ısıtmasında kullanılabileceğinin Avrupalılar tarafından keşfi
1322	Fransa'da köylülerin evlerini ısıtması
1800	Fransa'da yerleşim birimlerinin jeotermal enerji ile ısıtılmasının yaygınlaşması, ABD'de kaplıcaların hızla yaygınlaşması
1818	F. Larderel'in ilk defa jeotermal buhar kullanarak borik asit elde etmesi
1833	P. Savi tarafından İtalya'da Larderello Bölgesi'nin jeotermal rezervuarın araştırılması
1841	Larderello'da (İtalya) yeni teknikler kullanılarak jeotermal kuyularının açılması
1860	California'da (ABD) The Geysers tesislerinin açılması
1891	Boise Idaho'da (ABD) ilk jeotermal bölge ısıtma sistemi uygulaması
1900	Calistoga /California'da (ABD) otuzdan fazla kaplıca merkezi açılması
1904	Larderello'da (İtalya) jeotermal buhardan ilk elektrik üretiminin yapılması
1920	The Geysers'de (California/ABD) ilk jeotermal kuyuların açılması
1929	Klamath Falls'da (Oregon/ABD) evlerin jeotermal enerji ile ısıtılması
1930	İzlanda'da büyük ölçekli merkezi ısıtma projesi çalışmalarına başlanması
1945	ABD'de buzlanma önlemede, süt pastörizasyonunda ve sera ısıtmada jeotermal kullanılması
1958	Yeni Zelanda'da Flash Metodu ile jeotermal elektrik üretimine başlanması
1960	The Geysers (California/ABD) alanında elektrik üretiminde ilk kez kuru buhar kullanılması
1960	MTA Genel Müdürlüğü'nün jeotermal enerji araştırmalarına başlaması
1963	Türkiye'de ilk jeotermal sondaj kuyusunun Balçova'da (İzmir) açılması
1966	Japonya'da ilk jeotermal elektrik santralının kurulması
1968	Türkiye'de elektrik üretimi amaçlı ilk jeotermal kuyunun Denizli (Kızıldere)'de açılması
1969	İkincil çevrim jeotermal teknolojilerin California'da (ABD) başarı ile uygulanması
1969	Fransa'da büyük jeotermal ısıtma projelerinin başlaması
1970	Çin'de elektrik üretiminde ilk kez jeotermal akışkandan yararlanılması
1974	Türkiye'nin ilk jeotermal elektrik santralının (0.5 MWe) MTA tarafından kurulması
1978	New Mexico'da (Meksika) kızgın kuru kayada jeotermal rezervuar testlerine başlanması ve Nevada'da (ABD) ilk jeotermal gıda kurutma tesisinin kurulması
1979	Endonezya'da jeotermal enerji ile ilk kez elektrik üretiminin yapılması
1981	Puna'da (Hawaii) kurulan jeotermal tesislerin faaliyete geçmesi
1982	Türkiye'de Germencik (Aydın) jeotermal alanının keşfedilmesi
1983	Türkiye'de kuyu içi eşanjörlü ilk jeotermal ısıtma sisteminin Balçova'da kurulması
1986	Türkiye'nin ilk ticari jeotermal enerji santralının (20.4cMWe kapasiteli) Denizli'de açılması
1984	Oregon'da (ABD) mantar yetiştiriciliğinde jeotermal enerjiden yararlanılması
1987	Nevada'da (ABD) jeotermal akışkanın altın üretiminde kullanılması
1987	Türkiye'nin ilk jeotermal merkezi ısıtma sisteminin Gönen'de (Balıkesir) işletmeye açılması
1990	ABD'de jeotermal elektrik üretimi kurulu kapasitesinin 3.000 MWe'e yükselmesi
1992	Dünya'da 21 ülkede jeotermal elektrik üretiminin yaklaşık 6.000 MWe'e ulaşması
1996	Balçova'da (İzmir) 15.000 konut kapasiteli jeotermal merkezi ısıtma sisteminin açılması
2000	Dünyada jeotermal enerjiden yaklaşık 8000 MWe elektrik ve 17.000 MWt doğrudan kullanım gerçekleştirilmesi
2021	Türkiye, jeotermal elektrik uygulamalarında Dünyada 4., doğrudan kullanımda Dünyanın 2. Büyük ülkesi durumuna gelmiştir

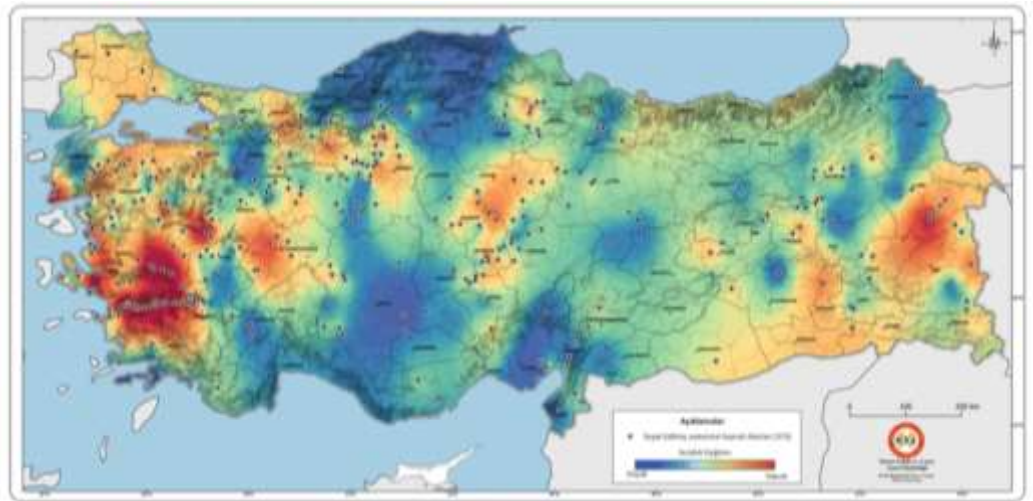
4.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji

Ülkemiz, Asya ve Avrupa arasındaki önemli ve stratejik bir jeolojik konumdadır. Tektonik olarak aktif olan Alp–Himalaya Dağ Oluşum Kuşağının da üzerindedir. Jeolojik bakımdan genç, aynı zamanda aktif faylarla volkanik ve magmatik oluşumlara sahiptir. Bu doğal yapılar ülkemizin zengin jeotermal potansiyelini oluşturur (Dinçer ve Ezan, 2020).

Türkiye’de jeotermal enerji potansiyelinin keşfi ve değerlendirilmesi, 1960 yılından itibaren Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü çalışmalarıyla başlamıştır. İlk arama faaliyetleri ve sondaj çalışması, 1963’te İzmir-Balçova’da gerçekleşmiş ve 40 metrede 124 °C sıcaklığında sıcak su ve buhar bulunmuştur. Bu bulgu daha o yıllarda, ülkemizin jeotermal enerji kaynakları hususunda önemli bir geleceğe sahip olduğunu göstermiştir.

MTA, 1968 yılında BM Kalkınma Teşkilatı (UNDP) ile ortak çalışmalar yürüterek, Denizli-Kızıldere jeotermal alanını keşfetmiştir. Bu alan, Türkiye’nin en önemli jeotermal alanlarının başında gelmektedir.

MTA’nın çalışmaları sonucunda, Türkiye’de jeotermal potansiyelin önemli bir kısmı ortaya çıkarılmıştır. Ülkemizdeki jeotermal sahalar, sıcaklık ve debi bakımından oldukça çeşitlilik göstermektedir. En yüksek sıcaklığa sahip jeotermal sahalar, Denizli-Kızıldere, Aydın-Germencik ve Manisa-Salihli-Göbekli bölgelerinde bulunmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Türkiye jeotermal kaynak alanları ve sıcaklık dağılımı (MTA).

1970-1980 yıllarında Türkiye’de jeotermal arama yapabilen tek kurum olan MTA Genel Müdürlüğünün çalışmalarıyla sıcaklığı yüksek akışkan elde edilebilen sahaların keşfiyle birlikte jeotermal konusu önemli bir aşama kaydetmiştir. O yıllarda yürütülen çalışmaların ortaya çıkardığı potansiyel, özellikle 1990 sonrasında özel sektörün ve belediyelerin konuya olan ilgilerini artırmıştır (Akkuş ve Alan, 2016). 2000’li yılların başlarında özel sektörün de arama ve işletme faaliyetlerine katılımının önü açılmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Taner YILDIZ, 2011 yılının ikinci yarısına başlarken Manisa’da yaptığı bir açıklamayla Alaşehir’de 282 °C sıcaklıkta bir jeotermal kuyuna sondaj yapıldığını duyurmuştur. Çalışmaların “özel sektörle işbirliği içinde gerçekleştirildiğini, 2011 Temmuz ayı koşullarında jeotermal’den elde edilen enerji ile 20 yerleşim biriminde 81.000 konutun ısıtıldığını, üç jeotermal sahasının özel sektöre ihale edildiğini, 29 jeotermal alanın daha ihale edileceğini” belirtmiştir (Erkul. 2012).

Türkiye jeotermal kaynaklar ve volkanik alanlar haritası Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Türkiye jeotermal kaynaklar ve volkanik alanlar haritası (MTA).

Türkiye’de jeotermal kaynakların aranmasına yönelik çalışmalar MTA Genel Müdürlüğü’nce yürütülerek, özellikle 2004 yılı itibariyle ivedilik kazanmış ve sondajlı jeotermal enerji arama çalışmaları yıllık 2000 metreden 28000 metrelere çıkmıştır. Bu çalışmalar neticesinde 10 tanesi elektrik üretimine uygun olan “[Aydın–Sultanhisar (146 °C), Aydın–Bozköy–Çamur (146 °C), Aydın–Atça (124 °C), Aydın–Umurlu (150 °C), Aydın–Nazilli–Bozyurt (127°C), Aydın–Pamukören (188 °C), Kütahya–Şaphane (181°C), Manisa–Alaşehir–Kavaklıdere (287 °C), Aydın–Buharkent (147 °C), Nevşehir–Güre (183 °C)]” diğerleri ise ısıtma/soğutma ve termal turizm için uygun olan çok sayıda yeni saha tespit edilmiştir. Bu çalışmalarla 173 tane olan keşfedilmiş jeotermal saha sayısı toplamda 239 sahaya çıkarılmıştır. 2020 yılına kadar 636 adet, 416293 metre sondajlı arama çalışması yapılarak, doğal çıkışlar dâhil, açılan kuyularla yaklaşık 5000 MWt ısı enerjisi elde edilmiştir. Ülkemizde Haziran 2022 sonu itibariyle toplam lisanslı jeotermal enerji santrali 65 adet ünite ve önlisans aşamasında olan 13 adet santral bulunmaktadır. Taşkiran L. 2022’den uyarlanmıştır. Türkiye 2019’dan bu yana jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretimi konusunda dünyada 4. ve Avrupa’da 1. sırada, jeotermal enerjinin direkt kullanım alanları düşünüldüğünde ise dünyada 6. ve Avrupa’da 4. konuma yükselerek gelişimini istikrarlı bir şekilde sürdürmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Enerji potansiyeli yüksek olan sahaların Batı Anadolu bölgesinde yoğun şekilde gözlenmesi, jeolojik yapıların ve süreçlerin doğal sonucudur. Bu bölgede gelişen çöküntü (graben) yapıları Türkiye’nin yüksek ısı gözlenen jeotermal alanlarını barındırmaktadır. Batı Anadolu’da yer alan bu yüksek ısı gözlenen rezervuarların çokluğuna karşın, Orta ve Doğu Anadolu bölgesinde düşük ve orta sıcaklık kategorisinde bulunan sahalar yer almaktadır. Bu sırayı potansiyeline göre İç Anadolu, Marmara, Doğu Anadolu, Güney Doğu Anadolu, Karadeniz ve Akdeniz Bölgeleri izler (Akkuş ve Alan, 2016).

Şekil 4.3’de Türkiye genelinde jeotermal kaynak dağılımı gösterilmektedir. Haritada ısıtma ve termal uygulamalara uygun olan düşük ve orta sıcaklıklı kaynaklar %88’lik yüzdeyle en yüksek orana sahiptir. Harita üzerindeki mavi ve yeşil daireler bu kaynakları temsil etmektedir. Harita üzerinde kırmızı daire ile gösterilen kaynaklar ise elektrik üretimi için uygun yüksek entalpili alanlardır.



Şekil 4.3. Türkiye'nin genç tektonik unsurları ve jeotermal kaynakları (Akkuş vd., 2005).

Yüksek sıcaklık tespit edilen jeotermal sahaları yoğun olarak Batı Anadolu dolaylarında bulunmaktadır. Bu alanlar, ülkemizin jeotermal enerji potansiyelinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bölgedeki şehirlerde farklı sıcaklıklara sahip kaynaklar olmasının yanı sıra farklı şekillerde bu enerjiden yararlanacak uygulamalardan yararlanılmaktadır.

Türkiye'nin orta ve doğu bölgelerinde de batısına göre orta ve düşük sıcaklık aralığında jeotermal sahalar keşfedilmiştir. Bu sahalar, ısıtma gibi doğrudan uygulamalar için kullanılmaktadır.

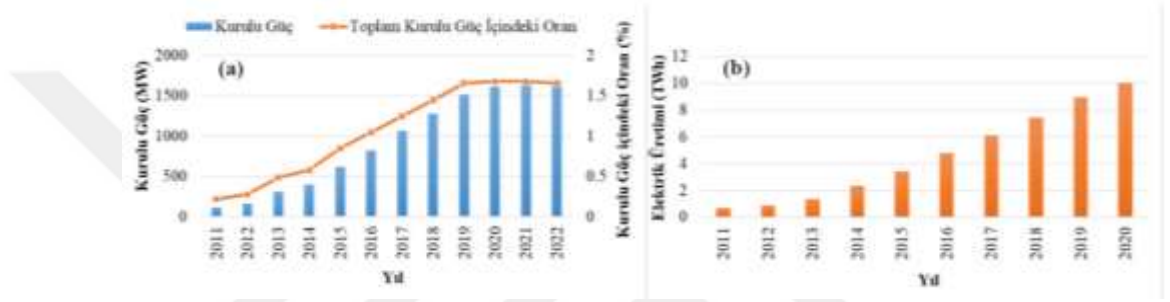
Akkuş'a göre (2020), Türkiye'nin Ege Bölgesi başta olmak üzere dört bir tarafına yayılmış toplam 347 jeotermal alan yer almaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Yine Akkuş'a göre (2020), Türkiye özelinde jeotermal sahalar üç grupta ele alınır:

- 20 °C – 70 °C'li Düşük Entalpili Sahalar
- 70 °C – 150 °C'li Orta Entalpili Sahalar
- 150 °C ve üzeri Yüksek Entalpili Sahalar

MTA'nın "Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları" raporuna göre 2022 yılı itibarıyla keşfedilen 243 jeotermal sahanın 25'i yüksek entalpili ve elektrik üretimine uygundur. Bu sahalardan 18'i aktif olarak elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Diğer 7'si ise henüz geliştirilme aşamasındadır. Bu sahalardan 1'inin 2023 yılında, 6'sının ise 2024 yılında elektrik üretimine başlaması planlanmaktadır.

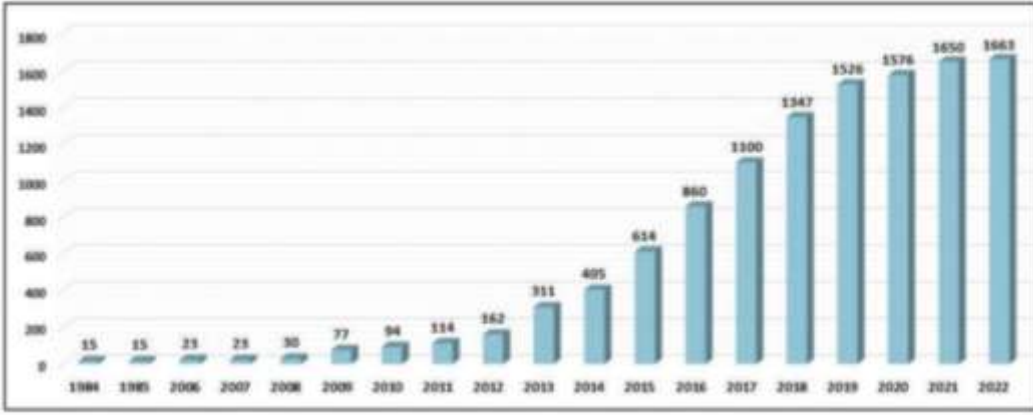
Türkiye’de yıllara göre jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç ve elektrik enerji üretimi Şekil 4.4.’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Ülkemizde yıllara göre jeotermal enerjiye dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (Özbektaş vd., 2023: 345).

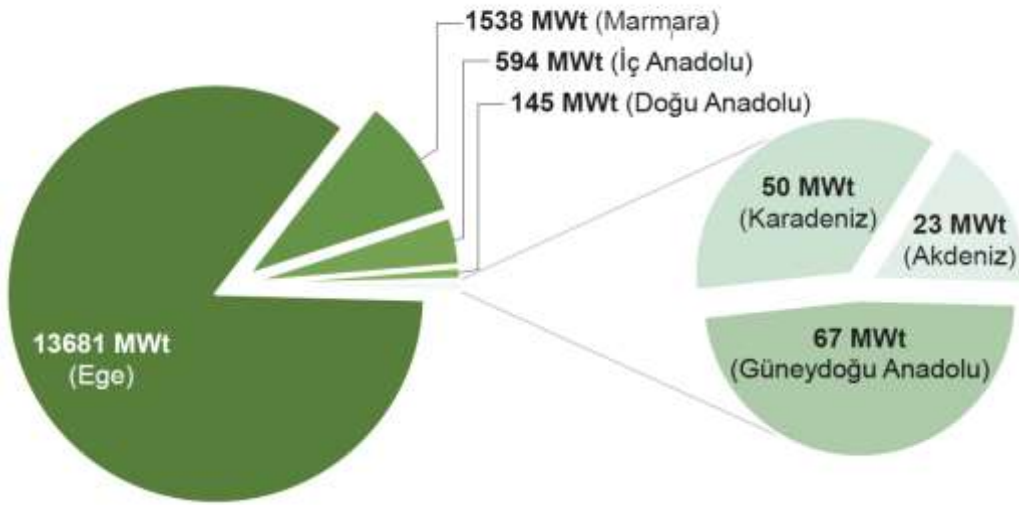
Şekil 4.4’ göre 2012 yılında 162 MW olarak tespit edilen kurulu güç 2022 Haziran ayından itibaren 1686 MW’a, toplam kurulu güç içindeki payıysa %0.28’den %1.66’ya yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Jeotermal enerjinin Türkiye’nin enerji üretimindeki oranıysa 2015 yılında %1.3 iken; 2020 yılında %3.3’e çıkmış ve üretim neredeyse üç katına yükselerek 10 TWh'a ulaşmıştır (Özbektaş vd., 2023).

Son yıllarda enerji güvenliğinin ve sürdürülebilirliğinin öneminin artması, jeotermal enerji yatırımlarını artırmıştır. Bu yatırımların en büyük etkisi, elektrik üretiminde görülmüştür. Türkiye, 15 MWe seviyelerinde uzun yıllar sabit kalan elektrik üretim kapasitesini, 2022 yılı itibarıyla 1.5 GW'a çıkararak, dünyada en hızlı büyüyen ülke olmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Türkiye’de jeotermal elektrik santrallerinin kapasitesinin gelişimi (MWe) (Şener vd., 2022).

Türkiye'deki jeotermal kuyuların potansiyelleri, bölgelere ayrılmış şekilde, Şekil 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.6. Ülkemizdeki bölgelerin jeotermal kaynak potansiyelleri (Dinçer ve Ezan, 2020).

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te sırasıyla Türkiye Jeotermal Derneği ve TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası verilerince Türkiye’deki jeotermal enerji kaynağı ile merkezi ısıtma yapan yerlerin listesi gösterilmektedir. Veriler arasında ufak farklılıklar olsa da, ülkemizde merkezi ısıtmanın yerini anlamak için önemli çalışmalardır.

Tablo 4.2. Türkiye Jeotermal Derneği'ne göre (2020), Türkiye'de jeotermal merkezi ısıtma yapılan yerler (Dinçer ve Ezan, 2020).

Alan Adı	Jeotermal ile ısıtılan konut sayısı 100 m ² Konut Eşdeğeri	İşletmeye alma yılı	Jeotermal su sıcaklığı (°C)	Kapasite (MWT)	Jeotermal saha ile şehir arasındaki mesafe (km)	Yatırımcı/Şirket
Balçova + Narlıdere	38000	1983-1996	140	243	3	Valilik ve Belediye eşit ortaklık A.Ş.
Gönen	3400	1987	80	19	2	Ağırıklı Belediye A.Ş.
Simav	14500	1991	125	110	5	Belediye
Kırşehir	1900	1984	57	20	1	Valilik (Ağırıklı) + Belediye A.Ş.
Kızılcahamam	2500	1995	70	28	2	Ağırıklı Belediye A.Ş.
Afyon	30000	1996	95	127,5	15	Valilik (Ağırıklı) + Belediye A.Ş.
Kozaklı	3000	1996	90	34	2	Ağırıklı Belediye A.Ş.
Sandıklı	11000	1998	75	119	10	Ağırıklı Belediye A.Ş.
Dişadin	570	1999	70	62	5	Ağırıklı Valilik A.Ş.
Salihli	7500	2002	94	57	6	Belediye
Sarayköy	2500	2002	95	19	10	Ağırıklı Belediye A.Ş.
Edremit	5500	2003	60	39	4	Yatırımcı ve İşletmecisi Özel Sektör A.Ş.
Bigadiç	1500	2005	96	7	18	Belediye
Dikili	2000	2009	125	19	10	Belediye A.Ş.
Bergama	450	2009	70	3	8	Belediye A.Ş.
Sorgun	1500	2008	80	19	2	Belediye
Sındırgı	300/3000	2014	98	24	12	Belediye + Özel Sektör A.Ş.

Tablo 4.3. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası'na göre (2020), Türkiye'de jeotermal merkezi ısıtma yapılan yerler (Dinçer ve Ezan, 2020).

Alan Adı	Sıcaklık (°C)	Konut Eşdeğeri	Alan Adı	Sıcaklık (°C)	Konut Eşdeğeri
Balıkesir-Gönen	80	3400	İzmir-Dikili	125	1500
Kütahya-Simav	120	17495	Nevşehir-Kozaklı	92	3000
Ankara-Kızılcahamam	80	2100	Ağrı-Dişadin	70	570
İzmir-Balçova-Narlıdere	98 – 125	37500	Manisa-Salihli	94	9000
Afyon-Sandıklı	70	17226	Denizli-Sarayköy	140	5000
Kırşehir-Terme	57	1800	Balıkesir-Edremit	60	5500
Afyon-Ömer-Gecek	95	25610	Balıkesir-Bigadiç	96	1500
Balıkesir-Güre	65	1400	Yozgat-Sorgun	80	2100
Sındırgı	98	2500	İzmir-Bergama	65	450
TOPLAM					137650

Tablo 4.4.'te ise sera ısıtması yapılan alanlar listelenmiştir. Toplam kapasite 4350 dönüm olup yeni sera alanları kurulmaya devam edildiği görülmektedir.

Tablo 4.4. Sera ısıtması yapılan alanlar (Dinçer ve Ezan, 2020).

Alan Adı	Sera alanı (da)	Alan Adı	Sera alanı (da)
Afyon-Merkez, Sandıklı, Heybeli	1310	Yozgat-Sorgun	81
İzmir-Balçova, Dikili, Bergama	819	Nevşehir-Kozaklı	60
Manisa-Salihli, Urganlı	756	Aksaray	60
Denizli-Kızıldere, Tosunlar	474	Ağrı-Diyadin	39
Şanlıurfa-Karaali	421	Uşak-Banaz	35
Kütahya-Simav	293	Van	32
Aydın-Germencik	153	Ankara	30
Adıyaman	112 ^(*)	Sakarya	6
Eskişehir-Mahmudiye, Şerefiye	96	Diğer	71
Kırşehir	92		
TOPLAM			4350

(*) Petrol kutusundaki sıcak su artırılarak kullanılmaktadır.

Türkiye’de ülkemize özgü jeotermal enerji potansiyelini daha da iyi anlamak ve hem verimli hem de çevreci şekilde bu enerji kaynağından yararlanmak için çalışmalara hız kesmeden devam edilmelidir. EPDK’ye göre (2022), 2006 senesinde 23 MWe seviyesinde olan jeotermal kaynaklı kurulu gücümüz 2022’den itibaren 1663 MWe’ye yükselmiştir (Şener ve ark., 2022).

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması ve çeşitlendirilmesi yaklaşımı, son yıllara bakıldığında jeotermal enerjide de olumlu sonuçlar vermiştir. Bu bağlamda, jeotermal kaynakların araştırılması, teknik çalışmaları ve yatırımları hızla artmış, kullanım alanları da çeşitlenerek yaygınlaşmıştır. Jeotermal enerji üretiminde hızlı bir büyüme yaşanmaktadır. Bu büyüme, yeni enerji santrallerinin devreye alınması ve konut, sera ısıtması ve termal kullanımlarda önemli yatırımların yapılmasıyla desteklenmektedir. Bu hızlı gelişim süreci kendi için bazı sorunlar barındırmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan çevresel etkiler, sıkça yapılan yönetmelik değişikliklerine uyum zorlukları, hem yöre halkında hem de işletmecilerdeki bilgi ve deneyim paylaşımı eksikliği gibi sorunlar günümüzde hala görülebilmektedir.

Akkuş'a göre (2020), sektörde öne çıkan sorunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ön çalışma ve aramalar yapılan dönemdeki riskler,
- Ruhsatlandırmaya yönelik hukuki, resmi, idari ve tekniknolojik sorunlar,
- İzleme ve denetim hususunda eksiklikler,
- İdari yapılanmada dağınık ile gelişen çok başlılık ve eşgüdüm yetersizliği,
- Sürdürülebilirliğe dair riskler,
- Etkin çözümler üretme ve verimlilik konularında yetersizlik,
- Ruhsat sayıları, ruhsat pazarının oluşması,
- Yatırımcıların güvende hissetmemesi.

Yukarıdaki problemlerin ortaya çıkmasına neden olan temel etmenler ise yine Akkuş tarafından aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Bu alanın uzunca bir süre kaynağa özgü yasalardan yoksun olması,
- Geçmişte yaşanan sorunlardan günümüze devam edenler olması,
- Hâlihazırdaki yasaların yetersiz olması,
- Yasalar oluşturulurken kaynağın dinamik özelliklerinin dikkate alınmaması,
- Mevzuattaki karmaşa,
- Yerel bir strateji oluşturulmaması,
- İdari yapılanma ve sürecin merkezi biçimde yönetilmemesi,
- Arama metodolojisindeki hatalar (Dinçer ve Ezan, 2020).

2007'ye kadar jeotermal enerji çalışmaları, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Devlet Planlama Teşkilatı tarafından onaylanan yatırım programları ve yıllık iş programları çerçevesinde, 3154 sayılı Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Kuruluş Kanunu başta olmak üzere 927, 6309 ve 5177 sayılı Kanunla değişik 3213 sayılı Maden Kanunu ve Anayasamızın 168. maddesinin verdiği yetkiye dayanarak devletimiz tarafından yürütülmekteydi. Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve jeotermal alandaki gelişmelerin sonucunda, jeotermal enerjiye özgü bir kanun oluşturulması ihtiyacı doğmuş ve 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu 2007 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu kanunu uygulamaya yönelik yönetmelik ise 2007

yılında yayımlanmıştır. Yasal düzenlemelere ek olarak, 2005 yılından sonra MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan arama çalışmalarının genişlemesi, Yenilenebilir Enerji Kanunu'nun (YEK) yürürlüğe girmesi ile oluşturulan teşvikler ve MTA tarafından keşfi gerçekleşen ve ön araştırmaları tamamlanan jeotermal alanların ihale yoluyla yatırımcıya devredilmesi gibi gelişmeler, jeotermal faaliyetlerde önemli artışlara neden olmuştur (Dinçer ve Ezan, 2020).

4.3 Dünyanın Önde Gelen Jeotermal Enerji Sahibi Ülkeleri

4.3.1 Genel bakış

Dünyada jeotermal enerji dendiğinde akla ilk gelen ülkeler, ülkemizin yanı sıra ABD, Endonezya, Filipinler, Yeni Zelanda, İtalya, İzlanda, Japonya, Çin, Rusya, Meksika'dır. Tablo 4.5.'de kurulu güç kapasitelerine göre ilk 10 ülkenin 10 yıllık değişimleri gösterilmektedir. Son satırda ise toplam kurulu gücün aynı süredeki değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Dünyada jeotermal enerji kaynaklı en yüksek kurulu güç kapasitesine sahip ülkeler (MW) (Özbektaş vd., 2023).

Ülkeler	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ABD	2592	2607	2514	2542	2517	2483	2444	2555	2587	3889
Endonezya	1336	1344	1404	1438	1533	1808	1948	2131	2131	2277
Filipinler	1847	1847	1916	1916	1916	1916	1928	1928	1928	1928
Türkiye	162	311	405	624	821	1064	1283	1515	1613	1676
Yeni Zelanda	726	798	924	941	941	941	965	965	984	984
Meksika	824	823	813	906	926	926	951	951	951	976
Kenya	206	206	366	619	653	673	684	684	863	863
İtalya	728	729	768	768	767	767	767	767	772	802
İzlanda	665	665	665	665	665	710	756	756	756	756
Japonya	512	512	508	516	526	476	473	481	481	481
Dünya	10479	10717	11157	11812	12137	12697	13169	13738	14073	15644

Bugünün kurulu jeotermal kapasitesine yaklaşık 3722 MWe ile ABD hâkimdir. Onu Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda izlemektedir. Jeotermal enerjinin termal ısı uygulamaları için doğrudan kullanımına bakıldığında ise tüketilen enerjinin dörtte üçünü yalnızca dört ülke (Çin, Türkiye, İzlanda ve

Japonya) oluşturmaktadır (Şener vd., 2022). Ülkeler sahip oldukları jeotermal enerji sıcaklığına göre farklı şekillerde enerji elde etmektedirler. Bu enerji üretiminin dünyadaki dağılımı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Dünya genelindeki jeotermal kaynaklarının doğrudan kullanım ve/veya elektrik üretimine uygunlukları (Uluslararası Jeotermal Birliği, 2024).

Entegre jeotermal santrali, elektrik üretiminin yanı sıra termal uygulamalarda da jeotermal enerjiyi kullanan bir tür jeotermal santraldir. Bu santrallerde, jeotermal enerjinin elektrik üretimi ve termal uygulamalar için eş zamanlı olarak kullanılması, enerji verimliliğini ve çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Entegre jeotermal santrallerde, elektrik üretimi için genellikle buhar türbinleri kullanılır. Buhar türbinleri, jeotermal suyun buharlaştırılmasıyla elde edilen buhar ile döndürülür ve elektrik üretir. Termal uygulamalar için ise genellikle jeotermal su doğrudan kullanılır. Jeotermal su, ısıtma, soğutma, endüstriyel uygulamalar ve spa gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir.

Entegre jeotermal tesisine iyi örneklerden biri bir yandan elektrik üretimi bir yandan da gıda kurutması yapan İzmir Seferihisar’daki santraldir. Entegre üretim hem ekolojik hem de ekolojik bir çözüm sunar.

Seferihisar’da 2021 yılında 1 kg yaş mandalina 5 TL iken jeotermal ile kurutulan mandalınanın kilosu 200 TL’den satılmaktadır. Dünya genelinde örnek olabilecek diğer kurutma örnekleri ise şunlardır:

- Amerika Birleşik Devletleri’nde Soğan ve Tahıl Kurutulması
- İzlanda’da Balık Kurutulması
- Yunanistan'da Domates ve Pamuk Kurutma
- Tayland'da Biber ve Sarımsak Kurutulması
- Kuzey Makedonya Cumhuriyeti'nde Pirinç Kurutma
- Meksika'da Meyve Kurutma
- Endonezya'da Fasulye ve Tahıl Kurutma (Şener vd. 2022)

4.3.2 İyi Örnekler: Yeni Zelanda ve İzlanda

Bu bölümde, dünyada jeotermal kaynak sahibi ülkeler incelendiğinde, jeotermal enerji kapasitesini en çevreci yöntemlerle kullanan, enerji üretimini doğa dostu ve iyi mühendislik yöntemleriyle yaparak diğer ülkelere örnek olan iki ülkenin incelemesi yapılacaktır.

Yeni Zelanda ve İzlanda jeotermal santrallerin kurulumunda ve işletiminde çevresel düzenlemelere uymaları konusunda, jeotermal atık suların arıtılması konusunda ve jeotermal enerjinin termal uygulamalarda yaygın olarak kullanılması konularında iyi örneklerdir.

4.3.2.1 Yeni Zelanda

Yeni Zelanda Jeotermal Enerji Raporu 2023'ten Öne Çıkan İstatistikler:

Jeotermal enerji, Yeni Zelanda'nın elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ülkenin elektrik üretiminin yaklaşık %20'si jeotermal kaynaklardan elde edilmektedir.

Yeni Zelanda'nın jeotermal enerji potansiyeli, yaklaşık 20.000 megavat (MW) elektrik üretimine eşdeğer olarak tahmin edilmektedir. Bu potansiyel, ülkenin elektrik ihtiyacının yaklaşık %30'unu karşılayabilir.

Yeni Zelanda'da 2022 yılı itibarıyla toplam 16 jeotermal santral bulunmaktadır. Bu santrallerin toplam kurulu gücü 1.700 MW'tır.

Yeni Zelanda'da jeotermal enerji, elektrik üretiminin yanı sıra termal uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkede jeotermal enerji ile ısıtılan yaklaşık 30.000 ev bulunmaktadır. (New Zealand Geothermal Association, 2024)

Campen et al. (2016)'a göre, Jeotermal kaynaklar geçmişte Yeni Zelanda yerli halkı Maori'lerce kullanılmıştır ve jeotermal sular birer kültürel hazine şeklinde değerlendirilmektedir. Bu konu, Kaynak Yönetim Kanununda sürdürülebilirliğin tanımlandığı ikinci kısım, beşinci bölüm içerisinde ifade edilmektedir:

Bölgesel ölçekte sahip olunan fiziksel ve doğal kaynakların karakteristik özelliklerinin korunarak sürdürülebilirliğinin sağlanması hedeflenmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

4.3.2.2 İzlanda

İzlanda, Kuzey Amerika ve Avrasya tektonik plakaları sınırlarında yer alan, volkanik aktivitesi yüksek bir ülkedir. Bu konumu nedeniyle, İzlanda hidrolik ve jeotermal kaynaklar açısından oldukça zengindir. Geçmişte fosil yakıtlara bağımlı olan İzlanda'nın, 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi sonrasında alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye başladığı görülmektedir. Bu dönemde, jeotermal enerjinin potansiyeli keşfedilmiş ve geliştirilmeye başlanmıştır.

IREC (2020) verilerine göre günümüzde, İzlanda'nın neredeyse tüm enerji ihtiyacı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Enerji üretiminin %69,70'i

hidroelektrik santrallerden, %30,30'u ise jeotermal kaynaklardan elde edilmektedir. Enerji üretiminde petrol ve rüzgarın paylarıysa %0,01 ve %0,02'dir.

İzlanda jeotermal kaynakların araştırılması ve kullanımını düzenleyen temel yasa Doğal Kaynaklar Kanunu'dur. İzlanda Çevresel Değerlendirme Yasası ise çevresel etki değerlendirmesine ile ilgilenmektedir.

İzlanda'nın bu kanun ile amacı, projelerin olası olumsuz çevresel etkisini değerlendirmek, projelerin çevreye yaptığı etkiler hakkında kamuoyunu bilgilendirmek, olası olumsuz etkilerle karşılaşmamak için önlemleri yumuşatmak ve halka çevresel etki değerlendirmesi hakkında yorum yapma ve katkıda bulunma fırsatı vermek şeklinde özetlenebilir.

Aylık periyotlarda jeotermal alandaki bütün kuyulardan tek tek çıkarılan veya re-enjekte edilen sıvının miktarı, jeotermal kaynağa re-enjekte yapılan suyun sıcaklık derecesi, su seviyesi ölçülebilen kuyulardaki ölçüm sonuçları ve jeotermal alan içerisindeki her üretim kuyusundan gelen akışkan entalpisinin ölçüm sonuçları, jeotermal suların ve gazların kimyasal analizleri, jeotermal kaynak simülasyonlarına dair sonuçlar, jeotermal rezervuardaki değişimleri gözlemlemek için yapılan ölçümlerin sonuçları ve en son sondaj sonuçlarına göre jeotermal rezervuarın fiziksel özelliklerinin daha iyi kavranmasının bir özeti gibi kapsamlı bilgiler verilmek zorundalığı bulunmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

2011 yılında Doğa Koruma ve Enerji Kullanımı için Master Plan Yasası, İzlanda Parlamentosu tarafından yürürlüğe konmuştur. Yasanın öncelikli gayesi, enerji üretim imkanlarının tespit edilerek doğanın ve kültürel mirasın koruma değerinin kapsamlı bir değerlendirmesi sonucunda arazinin enerji üretimi ve diğer sosyo-ekonomik değerleri de göz önünde bulundurarak kullanılmasını sağlamaktır. Master Plan esasen birbirinin zıt kutupları olarak düşünülebilecek “doğanın korunması” ve “enerjinin kullanımı” gibi iki uç nokta arasında uzlaştırma yapmak için bir vasıta.

4.3.2.3 Değerlendirme

İzlanda ve Yeni Zelanda, jeotermal enerji kaynaklarını geliştirme ve kullanma konusunda uzun bir geçmişe sahiptir. Bu iki ülke, jeotermal enerjinin sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve çevresel etkilerinin azaltılması için çeşitli düzenlemeler ve politikalar uygulamaktadır.

İzlanda ve Yeni Zelanda, jeotermal enerji kaynaklarının mülkiyeti, kullanımı ve elektrik piyasası düzenlemesi konusunda farklı geçmişlere sahiptir. Ancak, her iki ülke de jeotermal enerjinin sürdürülebilir kullanımı ve çevresel etkilerinin azaltılması konusunda birbirine bağlı yasalar ve politikalar uygulamaktadır.

İyi örnek olarak alınan her iki ülkenin de jeotermal enerji üretimini çevre ve sürdürülebilirlik öncelikli planladığı görülmektedir. Çevreye zarar vermeyen entegre sistemlere adapte oldukları ve sıcaklıklarına göre bu doğal kaynağı en etkin şekilde kullandıkları gözlenmektedir. Örneğin, Dincer ve Özcan (2018)'a göre İzlanda'da yaklaşık 70 balık çiftliği jeotermal su kullanmaktadır. Ayrıca İzlanda, %70' gibi büyük bir oranda jeotermal kar eritme uygulamalarıyla da dünyada lider konumdadır (Acar ve Köseoğlu 2021).

Sürdürülebilir enerji arzı açısından, jeotermal enerji kaynaklarının gelecek kuşakların da faydasına olacak şekilde, doğayı koruma ve geliştirme uygulamalarına özen gösterilerek etkin bir şekilde kullanılması önemlidir. Bu kapsamda, jeotermal enerji kaynaklarının kullanımının çevresel etkilerinin azaltılması ve sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

4.4 Türkiye’de ve Dünyada Elde Edilen Enerji Miktarları ve Potansiyel Enerji Varlıkları

Türkiye’de, 2000-2020 yılları arasında birincil enerji kaynaklarına olan talep dünya ortalamasının 3 katı olmuştur. Ek olarak ülkemiz, İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı (Organisation for Economic Co-operation and Development-OECD) ülkeleri içerisinde geride kalan 10 yıllık süreçte enerji talebinin en hızlı

arttığı ülkedir (Şener vd., 2022). Bu bilgi, Türkiye'nin nüfus artışı, sanayileşme artışı gibi nedenlerle enerji talebini hızla artırdığını göstermektedir.

Son yıllarda enerjiye duyulan ihtiyaç ile birlikte dünya enerji arzı da hızla artmaktadır (Tablo 4.6. ve Tablo 4.7.). Çoğalan enerji talebini karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, bütün dünyanın öncelikli gündemlerinden biridir. Bu alanda pek çok çalışma ve projeksiyon geliştirilmektedir (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. 1990-2010 ve 2035 talep senaryolarına göre dünya birincil enerji arzı içinde kaynakların miktarı (World Energy Outlook IEA 2013, Akkuş ve Alan, 2016).

Tablo 4.6. 2019-2023 yılları arası jeotermal enerjiden üretilen elektrik değerleri (MWe) (ThinkGeoEnergy verilerinden uyarlanmıştır).

	2019	2020	2021	2022	2023
A.B.D	3676	3714	3722	3794	3900
Endonezya	2133	2133	2276	2356	2418
Filipinler	1918	1918	1918	1935	1952
Türkiye	1526	1688	1710	1682	1691
Yeni Zelanda	1005	1005	1039	1037	1042
Meksika	963	963	963	963	976
İtalya	944	944	944	944	916
Kenya	861	861	861	944	985
İzlanda	755	755	754	754	754
Japonya	601	603	603	621	576
Diğer	1025	1025	1067	1097	1125

Tablo 4.7. Dünyada jeotermal kaynaklı güç üretim kapasiteleri (Dinçer ve Ezan, 2020).

Ülke	2015 yılı Kurulu Kapasite (MWe)	2015 yılı Üretimi (GWh/yıl)	2020 yılı Kurulu Kapasite (MWe)	2020 yılı Üretimi (GWh/yıl)	2020 – 2015 Yıllık Değişim (MWe)	2025 Yılı Öngörüsü (MWe)
A.B.D.	3098,00	16600,00	3700,00	18366,00	602,00	4313,00
Almanya	27,00	35,00	43,00	165,00	16,00	43,00
Arjantin	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00
Avustralya	1,10	0,50	0,62	1,70	-0,48	0,31
Avusturya	1,40	3,80	1,25	2,20	-0,15	2,20
Belçika	0,00	0,00	0,80	2,00	0,80	0,20
Çin	27,00	150,00	34,89	174,60	7,89	386,00
El Salvador	204,00	1442,00	204,00	1442,00	0,00	284,00
Endonezya	1340,00	9600,00	2289,00	15315,00	949,00	4362,00
Etiyopya	7,30	10,00	7,30	58,00	0,00	31,30
Filipinler	1870,00	9646,00	1918,00	9893,00	48,00	2009,00
Fransa	16,00	115,00	17,00	136,00	1,00	~25
Guatemala	52,00	237,00	52,00	237,00	0,00	95,00
Hırvatistan	0,00	0,00	16,50	76,00	16,50	24,00
Honduras	0,00	000	35,00	297,00	35,00	35,00
İtalya	916,00	5660,00	916,00	6100,00	0,00	936,00
İzlanda	665,00	5245,00	755,00	6010,00	90,00	755,00
Japonya	519,00	2687,00	550,00	2409,00	31,00	554,00
Kenya	594,00	2848,00	1193,00	9930,00	599,00	600,00
Kosta Rika	207,00	1511,00	262,00	1559,00	55,00	262,00
Macaristan	0,00	000	3,00	5,30	3,00	3,00
Meksika	1017,00	6071,00	1005,80	5375,00	-11,20	1061,00
Nikaragua	159,00	492,00	159,00	492,00	0,00	159,00
Papua Yeni Gine	50,00	432,00	11,00	97,00	-39,00	50,00
Portekiz	29,00	196,00	33,00	216,00	4,00	43,00
Rusya	82,00	441,00	82,00	441,00	0,00	96,00
Şili	0,00	0,00	48,00	400,00	48,00	81,00
Tayvan	0,10	1,00	0,30	260	0,20	162,00
Türkiye	397,00	3,127,00	1549,00	8168,00	1152,00	2600,00
Yeni Zelanda	1005,00	7000,00	1064,00	7728,00	59,00	200,00
Yakın Dönem Potansiyeller						
Dominika	0,00					7,00
Ekvator	0,00					50,00
İran	0,00					5,00

Dünya genelinde jeotermal enerji kurulu gücünün artması için yapılan çalışmalar sonuçlarını vermektedir. Şekil 4.9.'a göre Jeotermal Enerji Birliği (GEA) 2016 verilerine göre Amerika Birleşik Devletleri, dünya üzerinde en fazla jeotermal enerji kurulu gücüne sahip ülkedir. Endonezya, Filipinler ve Türkiye, dünya üzerinde jeotermal enerji kurulu gücünün en fazla arttığı ülkelerdir.

DÜNYA GENELİNDE JEOTERMAL ARTIŞI

Birçok ülke jeotermal elektrik üretimini artırma sürecindedir ve Jeotermal Enerji Birlikleri, jeotermal elektrik kapasitesinin 2021'de 18.4 GW'a, 2030'ların başlarında ise 32 GW'a ulaşabileceğini öngörmektedir.



Şekil 4.9. Dünyada jeotermal üretiminin artışı (Geothermal Energy Association, 2016).

Nüfusun, tüketimin ve ihtiyaçların artmasıyla ortaya çıkan enerji talebindeki artışı ekolojik yaşamı ve dünyanın sürdürülebilirliğini hesaba katmadan yönetmek mümkün değildir. Bu kapsamda Birleşmiş Milletler, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları altında yapılan çalışmalar oldukça değerlidir. Örneğin, Paris Anlaşması, iklim krizi sorunun etkilerini azaltmak için küresel bir işbirliğini hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşmak için, fosil yakıt kullanımının azaltılması, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının da yaygın bir biçimde kullanılması gerekmektedir.

5. JEOTERMAL ENERJİNİN TEMEL ESASLARI

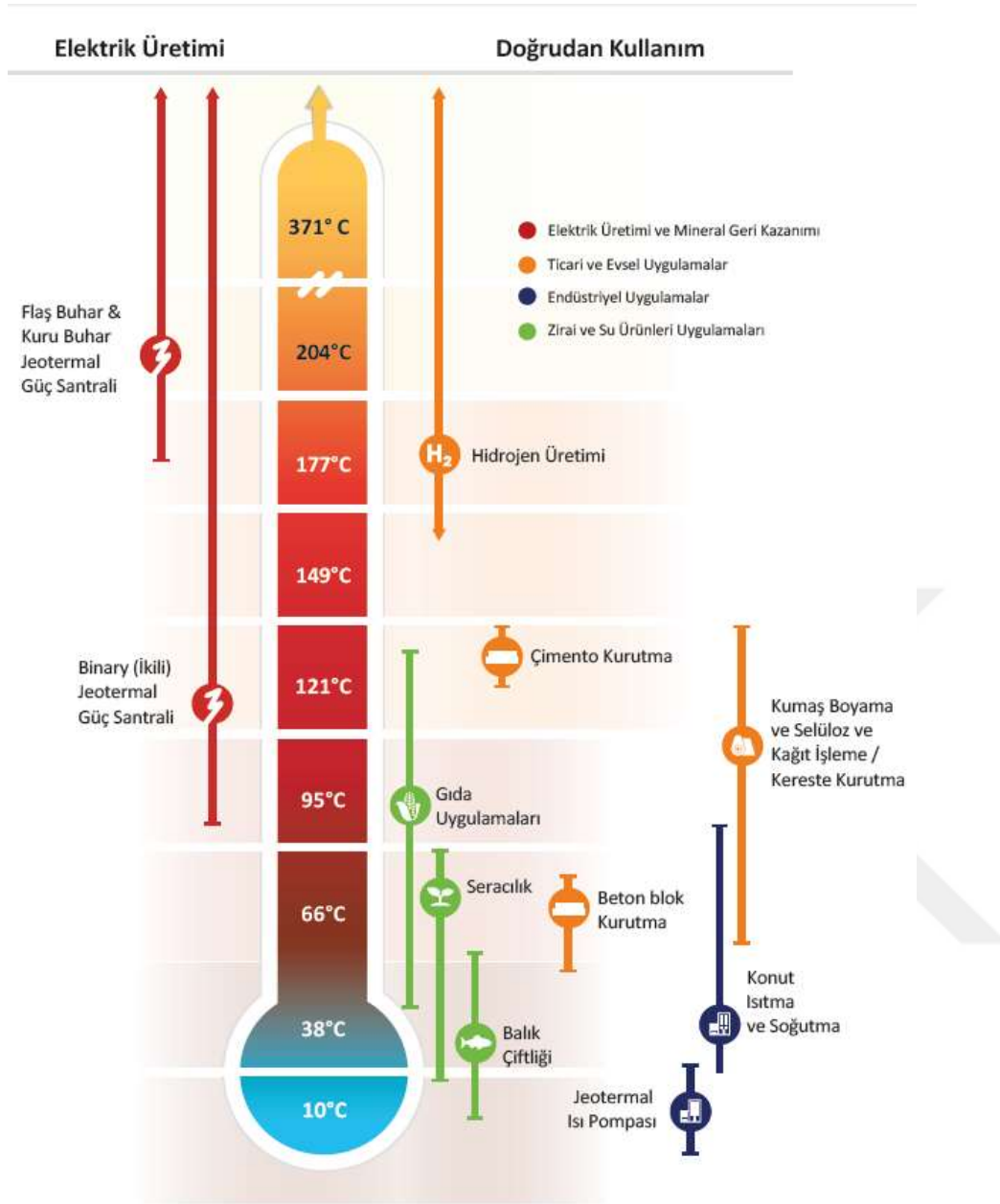
5.1 Jeotermal Suların (akışkanların) Özellikleri

Jeotermal akışkanlar, geçtikleri ortamdaki kayalara temas yoluyla ve sahip oldukları sıcaklık nedeniyle bu kayalardan bazı maddeleri çözerler. Bu çözülmüş maddeler, jeotermal suyun içerisinde taşınır. Jeotermal akışkan olarak adlandırılan bu sıvı, su, buhar ve gazlardan oluşur. Jeotermal suların içindeki çözülmüş maddelerin derişimi, su-kayaç ilişkisinin süresi, ortamın sıcaklığı ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Aslan (2010)'a göre, bir jeotermal alandaki jeotermal suyun kaynaktaki hareketi, türü, kökeni, yaşı, beslenme yüksekliği ve diğer sularla karışım oranları, termal su kimyası ile açıklanabilir (Poyraz 2016).

Yapılan çalışmalar jeotermal akışkanların yüksek oranlarda çözülmüş halde kurşun (Pb), amonyum (NH_4^+), demir (Fe), arsenik (As), bor (B), sodyum (Na), hidrojen sülfür (H_2S), sülfat (SO_4^{2-}), radon (Rn), kalsiyum (Ca), florür (F^-), magnezyum (Mg), klorür (Cl^-), potasyum (K), azot (N_2), hidrojen (H), mangan (Mn), cıva (Hg), bikarbonat (HCO_3^-), nikel (Ni), silisyum dioksit (SiO_2), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), çinko (Zn), lityum (Li), bakır (Cu), karbonat (CO_3^{2-}) gibi kimyasal maddeler ve zengin mineral tuzlar içerdiklerini göstermektedir. Akışkan içerisindeki çözülmüş maddelerin yoğunluğu kaynağına göre değişmektedir.

Jeotermal akışkanlar yüksek kimyasal içerikleri dolayısıyla içme ve sulama suyu kaynakları için kirletici niteliğindedir. Yanlış uygulamalar ile yüzey sularına deşarj edilen jeotermal suların Gediz ve Büyük Menderes gibi büyük nehirlerde sulama suyunun kalitesini bozmasından endişe edilmektedir. Bu sebeple jeotermal su kanununda da belirtildiği üzere, jeotermal sistemin ve çevrenin korunması için tüm jeotermal sahalarda re-enjeksiyon uygulamalarının ciddiyle uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Jeotermal suların sıcaklıkları ve kullanım alanlarına yönelik bilgiler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Jeotermal kaynak oluşumu ve kullanım alanları (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal sular yüzeye sıcak su, kaynar su, buhar veya gazlarla birlikte doğal yollarla çıkabilirler veya özel tekniklerle çıkartılırlar. Jeotermal ısıtmada jeotermal sularda bulunan kimyasallar ve gazların ortaya çıkarabileceği kabuklaşma (*kalsit, silis, stibnit*) ve korozyon sebebiyle ikincil akışkana ısıyı aktararak şehir, ev, sera ve sanayide kullanılmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020). Jeotermal suların bünyesinde çeşitli mineraller ve çeşitli yoğunluklarda ağır metaller bulunabilmektedir. Yüzeeye çekilen jeotermal suların çevreye ve insan sağlığına zarar vermemesi için kesinlikle yeniden kuyuya basılması gerekmektedir. Re-enjeksiyon uygulamasından önce

lityum, platin, altın, gümüş ve paladyum gibi değerli metallerin akışkan içerisinden ayrıştırılması, aynı jeotermal kaynaktan sağlanan elektrik ve ısıtma gücüne ek bir katma değer olarak verimliliği artıracaktır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Aydın'da yapılan bir çalışmada istasyonlara göre suların sıcaklıkları; 80, 205, 242, 43, 38, 30, 34.1, 38.1 °C olarak, pH değerleri; 8.8, 8.2, 8.6, 7.78, 5.69, 6.85, 6.58 olarak, elektriksel iletkenlik değerleri 6280, 4940, 5700, 5530, 5670, 1662, 1140, 4170 mS/cm olarak ölçülmüştür. Na değerleri; 1162.3, 1351.5, 1503.6, 1059.7, 1094.5, 40.6, 26.2, 727.6, K değerleri; 117.49, 182.26, 196.64, 80.91, 95.05, 6.59, 1.47, 52.65, Ca değerleri 13.60, 11.13, 11.63, 114.55, 115. 87, 59.68, 177.98, 140.34, Mg değerleri 0.088, 0.848, 0.793, 51.406, 51.103, 110.60, 117.23, 28.63 mg/L olarak ölçülmüştür. Bor ise jeotermal sularda ortalama 1.0 mg/L, maksimum 5.0 mg/L gözlenmektedir. (Yılmaz, 2013)

5.1.1 Jeotermal akışkanlarda değerli metal oluşumu ve kazanımı

Yıldız'a göre (2020), jeotermal enerji, yer kürenin akkor halindeki çekirdek bölümünde yer alan ısı enerjisinin yayılmasıyla meydana gelen ve yer kabuğuna kadar yayılan ısı gücü şeklinde tanımlanır ve jeotermal gradyanı meydana getirir. Bu ısı enerjisi, çeşitli zamanlarda kabuk içine sokulan ve mantodan kaynaklanmakta olan magma intrüzyonları (sokulumları) ve/veya volkanik faaliyetleri oluşturan, yine manto kökenli magmatik ceplerle kabuk içerisinde ısı anomalisi yaratırlar. Bourcier et al.a göre (2005), yağmurlar ile yer yüzeyine inen ve kayaçların gözenek özelliğine ve geçirgenliklerine bağlı olarak yerin derinliklerine süzülen meteorik sular, bileşiminde çeşitli mineralleri içeren ve yüksek jeotermal gradyan sebebiyle ısınmış kayaçlarla etkileşime girerek ısınmakta, bu olayların sonucunda jeotermal suların kimyasal bileşim ve fiziksel özelliklerinde farklılaşmalar meydana gelmektedir. Meteorik sularla ısınmış kayaçlar arasındaki bu etkileşim su, buhar ve bunların karışımından oluşan jeotermal akışkanları kolaylıkla çözünebilen mineraller ve metaller bakımından doygun hale getirmektedir. Böylece Yıldız'a göre (2020), bu sular lityum (Li), paladyum (Pd), sezyum (Cs), rubidyum (Rb), altın (Au), platin (Pt), gümüş (Ag) gibi değerli metaller ve nadir toprak metalleri açısından zengin hale gelirler. Suların yerin altındaki dolaşımında temas ettikleri kayaçların bileşimi, akışkanın

kimyasal bileşimi ve akışkan kayaç etkileşimi sırasındaki ortamın sıcaklık, basınç ve pH koşulları, karışım ve kaynama gibi rezervuar işlemleri jeotermal suların sonuçtaki kimyasal bileşimini etkileyen en önemli faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal akışkanlarda bulunan değerli metaller, endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Lityum (Li), seramik ve cam yapımında kullanılmaktadır. Özellikle yeniden şarj edilebilir lityum bataryalarda kullanılması nedeniyle ülke ekonomisinde önemli bir yer tutmaktadır.

Sezyum (Cs) ve rubidyum (Rb), termoiyonik uygulamalarda ve fotosellerde kullanılmaktadır. Sezyum ve rubidyum, vakum tüplerinde oksijen giderici olarak kullanılmaktadır. Fotosellerde ise, bu metallerin yüksek fotoelektrik verimi nedeniyle, alaşım olarak kullanılmaktadır.

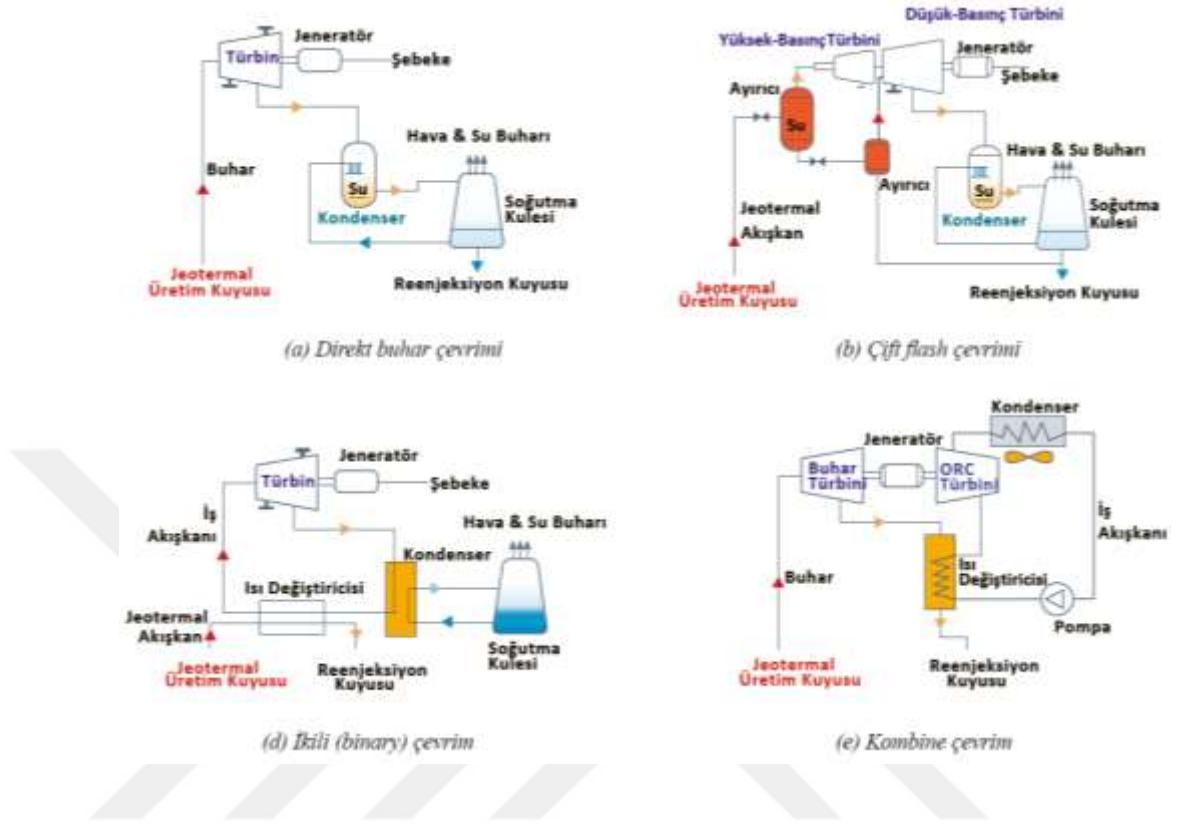
Altın (Au), platin (Pt), paladyum (Pd) ve gümüş (Ag), katalizör olarak kullanılmaktadır. Bu metallerden, özgül fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle, tarım, ilaç, petrol, kimya gibi sanayi alanlarında katalizör olarak faydalanılmaktadır.

Bu metallerin daha verimli bir şekilde kullanılması ve geri dönüşüm yoluyla elde edilmesi, jeotermal enerjinin sürdürülebilirliği açısından önemli bir adım olacaktır. Jeotermal akışkan içerisindeki mineral rezervlerinin tahmin edilmesi mümkün olabilir (Çetin ve Tarcan, 2023). Çağa uygun ve çevreci mühendislik uygulamaları kullanılarak jeotermal kaynaklardan en verimli şekilde yararlanılmalıdır.

5.2 Jeotermal Enerji Tesislerin Özellikleri

Elektrik üretimine dair ilk uygulamalarda jeotermal akışkan ile buhar ayrıştırılmış ve ayrıştırılan buhar, buhar türbinine iletilerek, türbini döndürmesiyle elektrik enerji elde edilmiştir. Türbinden çıkan düşük entalpili buhar ise doğrudan atmosfere boşaltılmıştır. Daha sonralarda gerçekleşen uygulamalarda türbinden çıkan düşük entalpili buharın atmosfere salınması yerine yoğunlaşma sistemleri

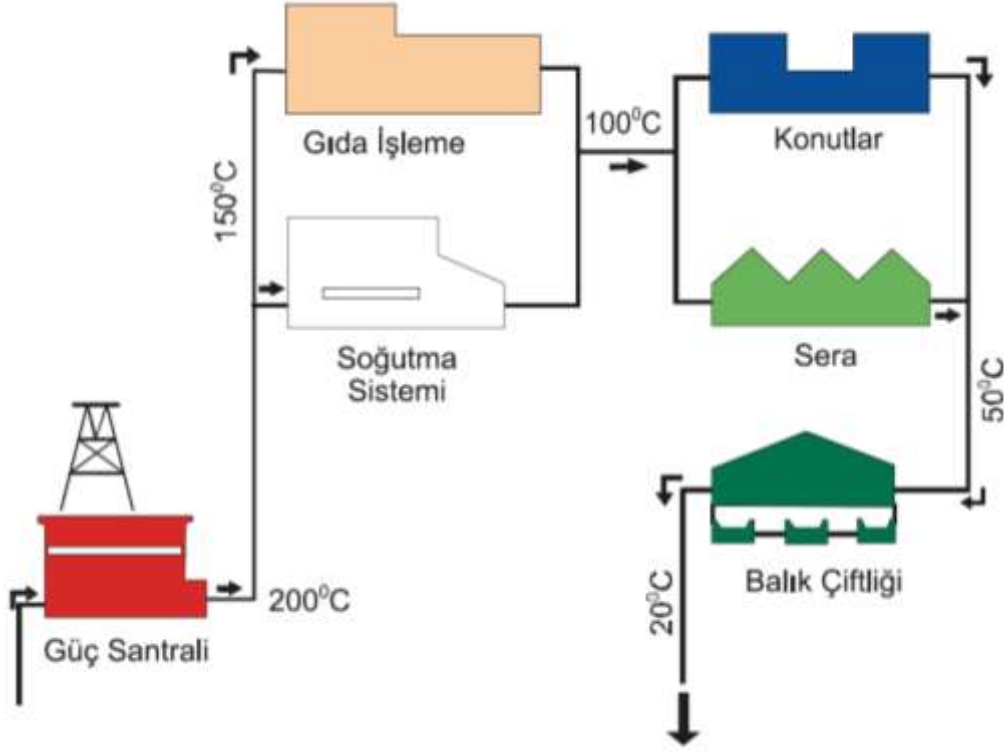
geliştirilmiştir. Tek, çift ve üç buharlaştırıcı sistemler geliştirilerek ve jeotermal kaynaktan sağlanan toplam verim de bu yolla artırılmıştır (Dinçer ve Ezan, 2020).



Şekil 5.2. Jeotermal güç çevrimi örnekleri (Dinçer ve Ezan, 2020).

Farklı tip jeotermal güç üretim çevrimleri bulunmaktadır. (Şekil 5.2.) Bu farklı özelliklerdeki jeotermal santraller destekleyici sistemlerle entegre şekilde çalışırlarsa verimleri artar. Jeotermal enerjinin entegre şekilde değerlendiriliyor oluşu, elektrik üretimi, tarımsal ısıtma, şehir ısıtma, kaplıca amaçlı kullanım, endüstri amaçlı kullanım, kimyasal ürünler eldesi (ağırlıklı olarak CO₂ gazı, sıvı CO₂, lityum ve mangan) ile hem teknik hem ekonomik anlamda daha cazip hale gelmektedir.

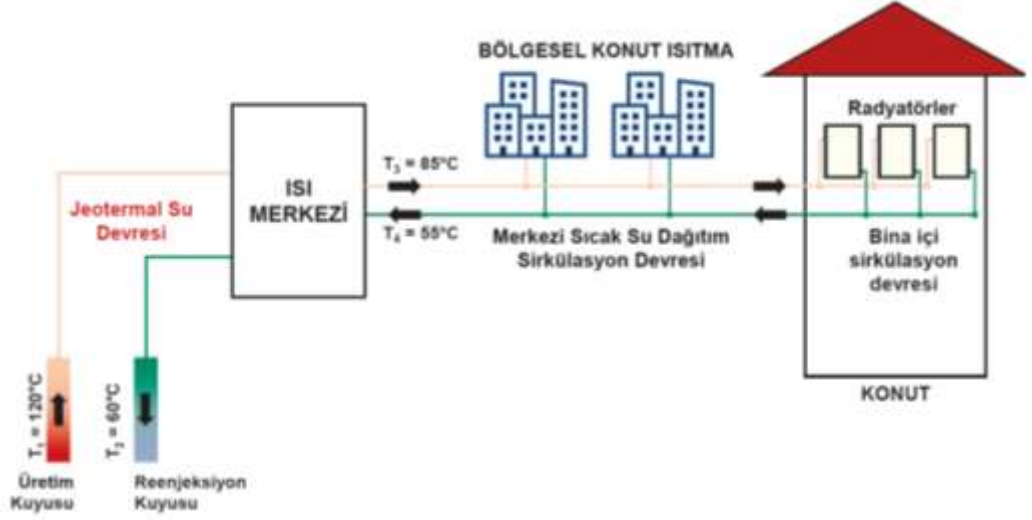
Şekil 5.3, jeotermal kaynaktan elde edilen akışkanın güç üretiminin yanı sıra, ısıtma/soğutma, gıdaları işleme, tarımsal ısıtma ve balıkçılık alanında kademeli (*cascaded*) kullanımını şematik bir biçimde göstermektedir. Şekil 5.4'de ise jeotermal enerjinin elektrik üretimi ve doğrudan kullanıma dair sektör alternatifleri ve ihtiyaç duyulan kaynak sıcaklıkları şematik olarak gösterilmektedir. (Dinçer ve Ezan, 2020)



Şekil 5.3. Kademeli jeotermal güç çevrimi örneği (Dinçer ve Ezan, 2020).

Merkeze yakın konumdaki binalarda basınç farkının çok yüksek olduğu, sistemin sonundaysa basınç farkının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu durumun önüne geçilmesi ve sistemde debi dağılımının dengelenebilmesi amacıyla debi kontrolü yapan vanalar kullanılmaktadır. Merkezi jeotermal su devresi, bölgesel konut ısıtma devresi ve bina içi sirkülasyon devrelerine ait tasarım sıcaklıkları Şekil 5.4 üzerinde belirtilmiştir. İhtiyaç ve tüketim alışkanlığına bağlı şekilde kullanıcıların vereceği tepkiler, sistemin enerji yönetimini dinamik bir biçimde etkilemektedir. Bu süreci daha iyi yönetebilmek için binalarda debi kontrolü sağlayan cihazlar kullanılmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Isı pompaları, evleri ve iş yerlerini ısıtmak, soğutmak ve sıcak su sağlamak için kullanılan çevre dostu bir sistemdir. Bu sistem, toprağın doğal ısı depolama kapasitesinden yararlanarak çalışır.

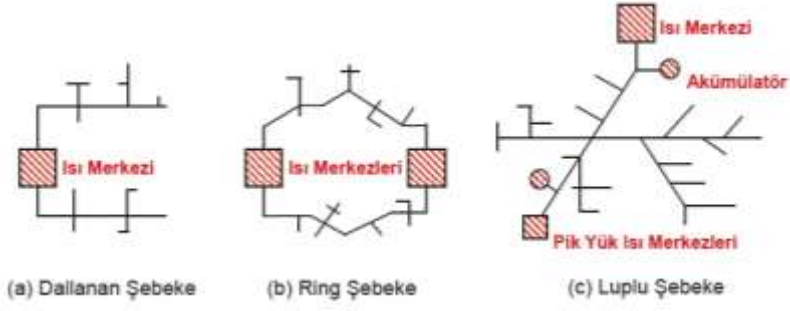


Şekil 5.4. İzmir Jeotermal Bölge Isıtma Sistemi tasarım kriterleri (Dinçer ve Ezan, 2020).

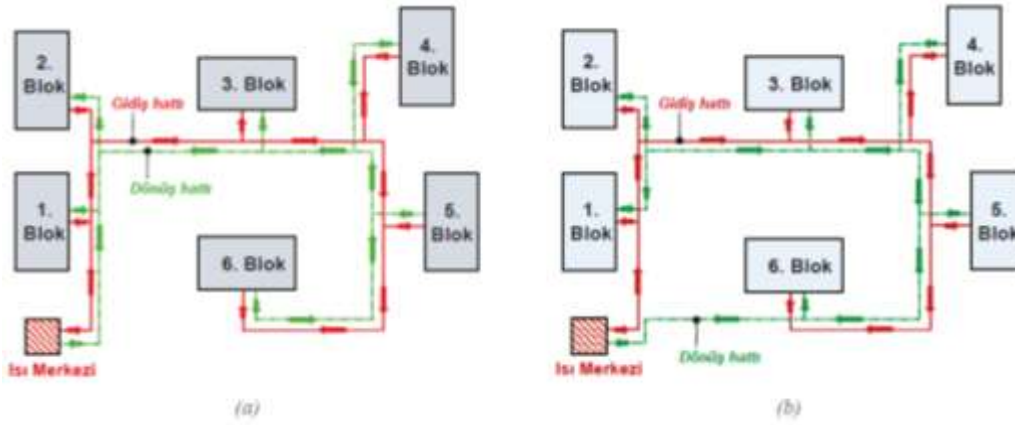
5.2.1 Jeotermal (Toprak) kaynaklı ısı pompaları ve bölgesel ısıtma

Sıklıkla jeotermal (*kaynaklı*) ısı pompaları (JIP'ları) olarak isimlendirilen toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP), göreceli olarak daha yüksek enerji kullanım verimleri sebebiyle geleneksel ısıtma-soğutma sistemlerini ikame edebilecek önemli bir alternatif olarak son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Dünya çapında kurulumlar yoğun olarak Kuzey Amerika, Avrupa ve Çin'de gerçekleşmesine rağmen, kurulum olan ülkelerin sayısı 2000 yılında 26 ülkeden, 2005 yılında 33'e, 2010 yılında 43'e ve 2015 yılında 48'e yükselmiştir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Toprak kaynaklı ısı pompaları ile bölgesel ısıtma sistemlerinin avantajları yüksek verimlilik, çevre dostu olmaları ve uzun ömürlülük olarak söylenebilir. Şekil 5.5. ve Şekil 5.6'da sırasıyla farklı tip şebeke yapıları (*dallanan, ring ve luplu*) ve sistem hidrolik dengeleme tasarımlarına (*düz ve ters geri dönüş*) örnek gösterilmiştir. Tek merkezli bölgesel ısıtma sistemleri, bir tek ısı pompası tesisinin birden fazla binaya ısı sağladığı sistemlerdir. Bu sistemler, genellikle küçük veya orta ölçekli yerleşim yerlerinde kullanılır. Çok merkezli bölgesel ısıtma sistemleri, birden fazla ısı pompası tesisinin birden fazla binaya ısı sağladığı sistemlerdir. Bu sistemler, genellikle büyük ölçekli yerleşim yerlerinde veya sanayi bölgelerinde kullanılır.



Şekil 5.5. Bölgesel ısıtma şebekesi çeşitleri (Dinçer ve Ezan, 2020: 57).



Şekil 5.6. İki borulu dağıtım sistemleri şematik gösterimleri, (a) düz geri dönüşlü, (b) ters geri dönüşlü (Dinçer ve Ezan, 2020).

6. JEOTERMAL ENERJİ KULLANIMININ ARTMASIYLA OLUŞABİLECEK OLASI ÇEVRESEL ETKİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Baba (2015) ve Baba and Armenson'a göre (2016), jeotermal enerjinin kendisinin ve direkt biçimde kullanılmasının çevresel etkileri, fiziksel ve kimyasal olacak şekilde iki ana etki grubunda incelenebilir. Fiziksel etkilere bakıldığında ilk olarak işletmeden önceki inşaat süreçleri ve yapım aşamalarını göze çarpmaktadır. İşletme esnasında görülen fiziksel etkiler ise görsel-işitsel kirlilik, sismik tetikleme ve çökme nedeniyle rezervuar ve su kaynaklarının fiziksel ölçümlerindeki değişimlerini içermektedir. Kimyasal etkilere bakıldığında jeotermal su ve buharların kimyasal bileşimi ile yüzeye çıktıktan sonraki etkilerini içerdiği görülmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Çevresel olumsuz etkileri gelişmiş mühendislik uygulamaları, iyi düşünülmüş mevzuatlar ve denetlemeler ile bertaraf etmek mümkündür. Baba'ya göre (2020), jeotermal santraller tarafından yol açılan çevresel etkilerin genelde jeotermal akışkanların re-enjeksiyon yapılmayarak çevredeki alıcı ortamlara deşarjından kaynaklı olduğu görülmektedir. Ayrıca korozyon ve kabuklaşma sebebiyle meydana gelen tahribatlar ve bunların neden olduğu sızıntı ve kaçaklar, gaz salımı, görüntü kirliliği, mikro-sismisite, çökmeler, termal ve kimyasal kirlilik biçiminde ortaya çıkmaktadır. Bunlar gibi çevresel sorunlar yeni ve çağa uygun yöntemlerin (akışkandan mineral eldesi, CO₂ endüstride kullanımı, entegre sistemler gibi) artırılması ile minimize edilebilmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal enerji üretiminin artmasının yaracağı olumlu durumlar ve riskler şöyle listelenebilir:

Olumlu durumlar:

- Doğal ve doğa dostu oluşu
- Yenilenebilirlik
- Kırsal kalkınmaya uygunluk
- Yerel İstihdama katkı
- Sürdürülebilirlik
- Teknolojik gelişmelere açıklık
- Entegre kullanıma uygunluk
- Ekonomik bağımsızlık

Riskler:

- Çevresel yan etkiler
- Mikrosismisite
- Çökme
- Görsel-işitsel kirlilik

Risklerin başlıca nedeni yer altından çekilen jeotermal akışkanların re-enjeksiyon yapılmamasıdır. Re-enjeksiyon uygulanmaması sonucu akışkanların kaynağı dışındaki alıcı ortamlara deşarj yapılması, çevresel sorunların en büyük nedenlerindedir. Jeotermal suların yüzey sularına ya da toprağa deşarjı yasal prosedüre aykırıdır. Öte yandan yüzeye çıkartılan suyun geri deşarj edilmemesi jeotermal sistemin devamlılığını da tehlikeye atar. Yani işletmeciler re-enjeksiyon yapmayarak sadece çevresel sürdürülebilirliği değil işletmelerinin de uzun vadede geleceğini ve sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. Re-enjeksiyon yapılmamış olan sistemlerde sıcaklıkta, basınçta ve debide rezervuara ait parametreler hızla düşmekte, sistemin devamlılık özelliği yok olmakta ve santrallerin verimi azalmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Ülkemizde jeotermal santral faaliyetleri yanı sıra, sanayi, tarım, ulaşım, inşaat, turizm, diğer enerji üretimleri gibi çevre kirliliğine neden olabilecek faaliyetler, kapasitelerine göre ÇED raporu almalıdırlar. Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED), planlanan bir faaliyetin çevresel etkilerini önceden belirlemek ve bu etkileri azaltmak veya ortadan kaldırmak için alınacak önlemleri belirlemek amacıyla yapılan bir süreçtir. ÇED'in temel amaçlarının başında, ekonomik ve sosyal gelişmeyi engellemeden, çevre değerlerini korumaktır. ÇED, kirlenmeyi önlemeye yönelik bir yaklaşımdır. ÇED süreci, kirlenme meydana geldikten sonra temizlik yapmak yerine, kirlenmeyi önlemek için gerekli önlemlerin alınmasını sağlar. Bu sayede, çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması mümkün olmaktadır.

6.1 Olumlu Etkiler

Jeotermal enerji hem küresel hem de ulusal bir enerji kaynağı olduğu, ithal edilme, ihraç edilme ve küresel fiyatlandırma ihtiyacı olmadığından savaşların ve uluslararası problemlerin bir nedeni olmadığı söylenebilir.

Jeotermal ısıtma ile birlikte mazot, kömür, odun ve bunlara ait atıkların taşınmasının ortadan kalkacağından şehrin içindeki trafik yükünü azaltmanın yanı sıra çevresel olarak sorun teşkil eden CO₂ gibi gazların azaltılmasına da ciddi katkıda bulunmaktadır. Üstelik bugün birçok yerde halka arz edilen jeotermal ısı satış fiyatı doğalgazdan %70 daha ucuzdur (lokal ev tarifesi) (Şener vd., 2022). Hem ısıtma hem de soğutma gerçekleştirmek mümkündür.

Jeotermal kaynaklardan elde edilen elektrik ve doğrudan kullanım faaliyetleri ülkelerin kalkınmasında önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu katkı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak ve enerji maliyetlerini düşürerek sağlanıyor. Ekonomik açıdan da ülke ekonomisine doğrudan faydalıdır. Örneğin, İzlanda ülkede ısıtma/soğutma sistemi için gereken enerji ihtiyacını %90 oranında jeotermal kaynaklardan elde etmektedir. Bunun yanı sıra yerli ve yabancı turistlerden elde edilen jeotermal odaklı turizmden kaynaklanan gelirlerin ülkelerin ekonomilerine katkıları oldukça önemli boyutlardadır (Şener vd., 2022).

Jeotermalin doğrudan kullanım alanlarından biri olan kurutma işlemi gıda güvenliğine ve aynı zamanda sera gazı salınımına çevreci bir çözüm sunar. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin 2020 raporuna göre 2010 ve 2016 yılları arasında dünyadaki sera gazı emisyonlarının yaklaşık %9'u gıda atıklarından kaynaklanmaktadır (IPCC, 2020; Mbow ve diğ., 2019). Gıda kurutma işleminde jeotermal kaynakların kullanılması, gıda kaybı miktarını azaltmaya yardımcı olabilir. 2021 BM Gıda İsrafı Endeksi Raporu'na bakıldığında küresel ölçekte her yıl toplam 931 milyon ton gıdanın israf edildiğini göstermektedir (UNEP, 2021). Türkiye'de ise her yıl 7,7 milyon tondan fazla gıdanın israf edildiğini belirtmektedir. Aynı rapora göre Türkiye'de her yıl kişi başına 93 kilogram yiyecek çöp olarak atılmaktadır. Gıda kurutma bu israfı azaltabilir ve böylece ekonomiye ve çevreye olumlu katkıda bulunabilir (Şener vd., 2022).

Ayrıca farklı sistemlerle entegre şekilde planlanarak enerji kaynağından veya araziden birden fazla faaliyet alanı için yararlanabilmektedir. Dünyada entegre enerji santralleri yükseliştir. Birim alandan veya birim enerjiden daha fazla verim elde etmek bütün ülkeler için önemlidir.

6.2 Olumsuz Etkiler ve Riskler

Bu bölümde jeotermal enerjinin yaratabileceği risklerden ve yanlış uygulamalar sonucu oluşabilecek olumsuz etkilerden bahsedilecektir.

6.2.1 Hava kirliliği ve gaz emisyonları

2000'li yılların ilk çeyreği tamamlanırken, fosil yakıtların dünya çapında öncelik sorunlardan biri olan iklim değişikliğindeki etkisinin azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarına hızlı bir yönelim olduğu görülmektedir. Diğer santrallerle kıyaslandığında, jeotermal kaynaklardan elde edilen elektrik, daha düşük sera gazı salınımına neden olmaktadır. (Tablo 6.1) Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), bir kilowatt saat (kWh) fosil enerjiden elde edilen gücün bir kilowatt saat jeotermal enerjiyle ikame edilmesinin, tahminen küresel ısınmaya olan etkiyi %95 oranı civarında azalttığını belirtmektedir. Jeotermal santral tipi (açık-kapalı sistemler) CO₂ salınımı bakımından büyük önem arz etmektedir.

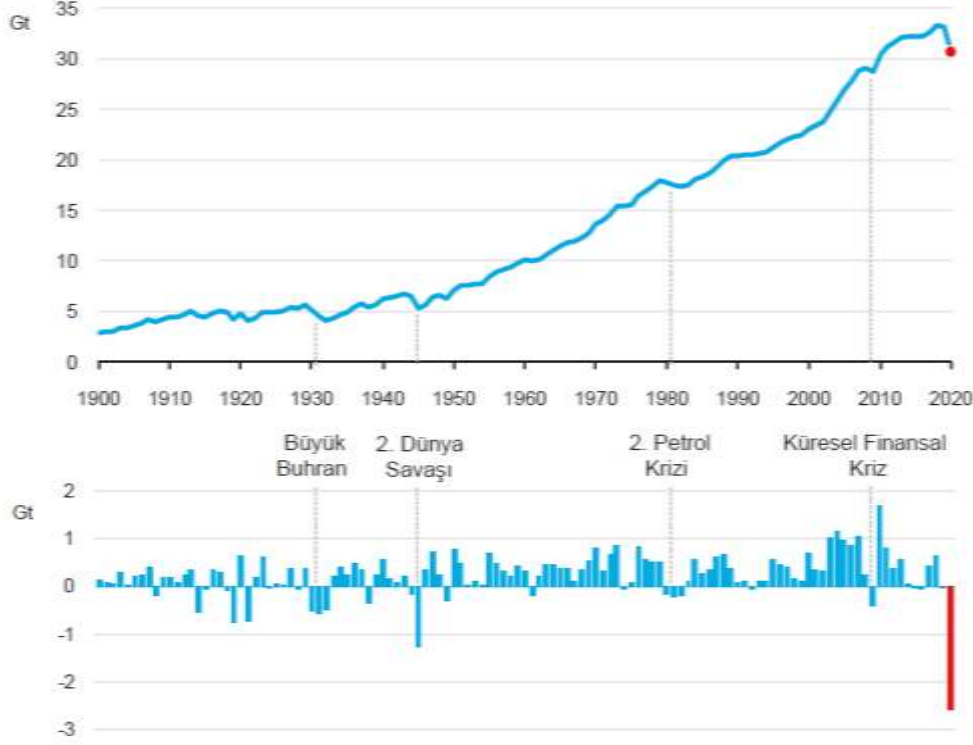
Kapalı devre sistemlerde, sondaj kuyusundan çıkartılan gazlar atmosferle buluşmamakta ve rezervuara geri gönderilmektedir. Bu sebeple, hava emisyonlarının minimum olduğu söylenebilir. Ancak, açık döngü sistemler karbondioksit, hidrojen sülfür, metan, bor ve amonyak yayılımına neden olmaktadır. Baba (2020), Batı Anadolu civarındaki jeotermal santrallerde hidrojen sülfür ve karbondioksit yüzdelerinin diğer gazlara göre daha yüksek konsantrasyonlarda olduğunu işaret etmektedir. Ege Bölgesinde gözlenen sular, karbonatlı kayalardan alındığından jeotermal sistemlerde yüksek CO₂ değerine sahiptir. Ancak, yapılan gözlemler, bölgedeki üretimlerin artması ile CO₂ konsantrasyonunun zamana bağlı olarak azaldığını ortaya koymaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Tablo 6.1. Çeşitli enerji santrallerine ait gaz emisyonları (ADÜTEM 2015).

Santral tipi	CO ₂ kg/MWh	SO ₂ kg/MWh	NO _x kg/MWh	Partikülât kg/MWh
Kömür yakıtlı	994	4,71	1,955	1,012
Akaryakıtlı	758	5,44	1,814	Bilgi yok
Gaz yakıtlı	550	0,0998	1,343	0,0635
Hidrotermal – flaş buharlı, sıvı hakim	27,2	0,1588	0	0
Hidrotermal – Gayzer kuru buhar sahası	40,3	0,000098	0,000458	Göz ardı edilebilir
Hidrotermal – kapalı-döngü ikili	0	0	0	Göz ardı edilebilir
EPA ortalaması, tüm ABD santralleri	631,6	2,734	1,343	Bilgi yok

Enerji santrallerindeki buhar akımının içerisinde taşınmakta olan yoğuşmayan gazların (NCGs – noncondensable gases) deşarjı, gaz emisyonlarını meydana getirmektedir. Hidrotermal tesisler değerlendirildiğinde en sık rastlanan yoğuşmayan gazlar, karbon dioksit (CO₂) ve hidrojen sülfür (H₂S) olsa da, düşük konsantrasyonlarda metan, hidrojen, sülfür dioksit ve amonyak da gözlenmektedir (ADÜTEM, 2015).

Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi Enerji kaynaklı CO₂ emisyonunun yıllar içerisindeki değişiminde 2019 yılından sonra, hem Covid 19 pandemisinin etkisi olduğu tahmin edilen hem de yenilenebilir enerji kaynaklarında son yıllardaki artışın sağladığı bir iyileşme görülmektedir. Bu iyileşmenin yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımların artması ve çevreci uygulamaların benimsenmesiyle devam edeceği tahmin edilmektedir.



Şekil 6.1. Enerji kaynaklı CO₂ emisyonunun yıllar içerisindeki değişimi (Dinçer ve Ezan, 2020).

Hava kalitesi açısından önemli etkilerden biri yoğuşmayan gazların (NCG) atmosfere salınmasıdır. Buharlaşma dereceleri suyun kaynama sıcaklığından farklı olan bu NCG gazlar, akışkan içerisinde yoğuşmadan gaz formunda yer yüzeyine ulaşabilirler. Jeotermal kaynaklardan elde edilen sular, %95-98 oranında buhar ve NCG'den oluşur. Yoğuşamayan gazlar yaklaşık olarak CO₂ (%95), CH₄ (%2-3), H₂S (%1-2) ve N₂ (%1-2) içerir. Çevresel açıdan en önemli kirletici gazlar karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S), amonyak (NH₃), civa (Hg) ve borik asittir (H₃BO₃). Jeotermal enerji, düşük karbondioksit (CO₂) ve diğer sera gazları salınım miktarları sebebiyle “iklim dostu” bir kaynak olarak kabul edilmektedir ve jeotermal santraller, fosil yakıtlı yakma santrallerinden daha düşük CO₂ yaymaktadır (Şener vd., 2022).

6.2.2 Su kirliliği

Batı Anadolu civarındaki jeotermal yapılar, kimyasal açıdan çok dikkatle incelenmesi gerekli olan yapılardır. Kimi sahalarda jeotermal suların deşarjı veya hatalı uygulamalar sonucunda toprak ve su kaynaklarında kirlilik gözlenmiştir. Bu sebeple, enerji üretiminin ardından re-enjeksiyon işlemi mutlak suretle

yapılmalıdır. Aynı biçimde jeotermal kuyuların sondajı esnasında veya sonraki çalışmalar sırasında kuyuda meydana gelebilecek sızıntı, patlama ya da fişkirmalar hem toprak hem de su kaynaklarını olumsuz etkilemektedir. Alaşehir ve Kula buna örnek olarak verilebilir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal akışkanlar içerisinde bulunan bazı çözünmüş mineraller (bor ve arsenik gibi) yerüstü veya yeraltı sınırlarını zehirleyebilmekte ve yerel bitki örtüsüne zarar verebilmektedir. Jeotermal akışkanlar ile kirlenmiş sular içme suyu ya da tarımsal sulama suyu olarak kullanıldıklarında ciddi etkiler gösterebilmektedir.

6.2.3 Katı emisyonları

Jeotermal santrallerin ilk kurulum süreçlerinde daha fazla olmak üzere tüm süreçlerde farklı tipte atıklar üretilebilmektedir ancak kaynak arama sürecindeki kuyu çalışmaları ve inşaat faaliyetleri, tüm aşamalar arasında en fazla katı atık üretme potansiyeline sahip süreçlerdir.

Öte yandan enerji eldesi sürecinde toksik etki gösterebilen ve kontrollü atık bertarafı yönetmeliğine tabi olan ve jeotermal rezervuardaki yolları tıkayabilen katı atıklar da oluşabilmektedir. Bunlara yönelik mevzuatların hassasiyetle denetlenmesi gerekmektedir.

EBRD'ye göre (2020a), ulusal mevzuat ve Avrupa talimatları neticesinde, atık üreticileri, üretim ile geri dönüşüm/bertarafa kadar olan süreçte kendi atıklarının sorumluluğunu almaktadır ve atık bertarafı için lisanslı firmalar ile çalışma sağlamalıdır (Şener vd., 2022).

6.2.4 Gürültü kirliliği

Jeotermal kuyuların çevresel ve sosyal etkilerinden biri ses/gürültü kirliliğidir. Santralin kurulum aşaması en gürültülü dönemdir. Bunlar için belirlenmiş gürültü yönetmeliklerine uysalar dahi, 24 saat süren inşaat çalışmaları yöre halkını rahatsız edicidir. Çeşitli susturucu, ses geçirmeyen mühendislik yöntemleri kullanılması bu süreci hem çevre hem de insan sağlığı için iyileştirmektedir.



Şekil 6.2. Hellisheidi Jeotermal Sahası'ndaki ses emici içeren kuyu başı örneği (Şener vd., 2022).

EBRD'ye göre (2020a), akustik duvar oluşturmak amacıyla kazıdan elde edilen toprak malzemeyi sondaj kulesinin etrafına dökmek ve yerleştirmek de jeotermal sondajda kullanılan çözümlerden biridir (Şener ve Ark 2022).

6.2.5 Arazi kullanımı

Jeotermal akışkanların yapıları ve atık akışının deşarjı konusunda uygulanabilecek seçenekler araziye özgü olduğundan, hidrotermal enerji santrallerinin arazi üzerinde kapladığı alanlar araziye göre farklılık göstermektedir. Uzun iletim boruları basınç ve sıcaklık kaybına sebep olduğu için, enerji santralleri genellikle jeotermal rezervuara yakın kurulmaktadır.



Şekil 6.3. Miravelles jeotermal enerji santrali tipik boru hattı, Costa Rica (Fotoğraf: R. DiPippo).

Boru hatları genelde taşıyıcılar üzerine oturtulduğundan, arazinin büyük bölümü otlak, tarım arazisi ya da diğer amaçlar için kullanılabilir durumdadır (Şekil 6.2). Enerji santralinin, soğutma kulelerinin, yardımcı binaların ve trafo merkezinin arazide kapladığı alan nispeten daha küçüktür. Sondajlar ve kuyuların deşarjları sırasında geçici deşarj amacıyla kullanılan biriktirme havuzları oldukça büyük olabilmektedir ancak toplam kuyu alanının küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Nükleer santrallerle kıyaslandığında flaş veya ikili jeotermal santralin yaklaşık yedi katı arazi işgal ettiği görülmektedir (ADÜTEM, 2015). Bu durum jeotermal enerji üretiminin bir diğer avantajı olarak görülebilir.

6.2.6 Arazi çökmesi

Jeotermal suların üretimdeki değerleri, beslenmedeki değerlerinden fazla olursa, konsolidasyon meydana gelebilmekte ve bu nedenle yüzey kotu düşerek yüzeyde çökme şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu durum jeotermal enerji üretimi tarihinde, re-enjeksiyon yapılmayan, Yeni Zelanda Wairakei sahasında gözlenmiştir (ADÜTEM, 2015). Reenjeksiyon süreci titizlikle gerçekleştirildiği takdirde arazi çökmesi gözlenmesi beklenmemektedir.

6.2.7 Sismik tetikleme

Baba'ya göre (2020) mikrosismisite, tektonik olarak aktif bölgelerdeki fayların aktivitesinin bir sonucudur. Bir deprem, fay aktif olduğunda ortaya çıkar ve zemini sallayan sismik dalgalanmalar meydana getirir. Depremsellik, nadir de olsa jeotermal sahaların ve doğal aktivitelerin geliştirilmesi de dâhil olmak üzere insan faaliyetlerinden kaynaklanabilmektedir. Richter büyüklüğü 3'ten küçük olan depremler, "mikro depremler" olarak adlandırılmaktadır. Jeotermal santrallerin etrafında mikro depremler meydana gelebilmektedir. Jeotermal suların yer yüzeyine çekimi ve rezervuara geri enjekte edilmesiyle mikro-depremler ortaya çıkabilmektedir. Jeotermal alanlarda sismik verilerin detaylı bir biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bu hususta Türkiye özelinde bakıldığında, yapılan çalışmalar yetersizdir. Dünya çapında bazı çalışmalar, bazı jeotermal sahalarda mikrosismisitenin arttığını ortaya koymaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

6.2.8 Doğal yaşam habitatına ve bitki örtüsüne müdahale

Çalışmada yer alan bu madde habitat kaybı veya bitki örtüsüne verilen zararlar ile ilgili problemleri ifade eder. Bir jeotermal alanın gelişimi için, elektrik santrali, trafo, kuyu-başı temelleri, boru hattı, acil durum biriktirme havuzları gibi tesislerin yerleşimi için ağaçların ve çalılığın sökülmesi gerekli olabilir. Ancak, jeotermal tesis inşaatının tamamlanmasını takiben, yeniden ağaçlandırma ve yeşillendirme çalışmalarısıyla bölgenin en azından eskiden sahip olduğu doğal görüntüye kavuşturulması, bina ve yapıların ekolojik çözümlerle saklanması sağlanabilir. (Şekil 6.4.)

Gökçen'e göre (2001), CO₂ gazı sera etkisi sebebiyle global etkiye sahip olmasına rağmen H₂S atımının etkisi lokaldır. Topografya, rüzgâr yönü ve toprak kullanımı gibi etmenlere bağlı olarak H₂S etkisi farklılıklar göstermektedir. Ekipman korozyonu, asit yağmurları, göz ve solunum yolları tahrişi nedeniyle rahatsızlık verici olabilir. Benzer şekilde H₂S yörede hoş olmayan kötü kokusuyla bölge halkının tepkisini çeken bir konudur (Dinçer ve Ezan, 2020).



Şekil 6.4. Ahuachapán jeotermal tesisinin 1977 ve 2005 yıllarındaki görüntüleri (DiPippo 1978, LaGeo 2005, ADÜTEM, 2015).

6.2.9 Doğal manzaranın bozulması

İnşaat aşamasının neden olduğu görsel kirlilik inşaat faaliyetlerinin ve hafriyat araçlarının ortaya çıkardığı atıkların depolandıkları alanlarda gözlenmektedir. İşletme aşamasında, görüntü kirliliği santralin boru hatlarından ve işletme binasından oluşmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal enerji santralleri, diğer enerji santrallerinden olan güneş, kömür, hidrolik ve nükleer santrallere göre kullanım alanı ve işletme binası açısından oldukça küçüktür. Kimi santrallerde borular gibi santral bileşenlerinin doğal yapıya uyumlu olarak boyandığı veya gizlendiği bilinmektedir. Bunun gibi iyileştirmeler görüntü kirliliğinin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

6.2.10 Katastrofik olaylar

Jeotermal enerji üretiminin farklı evrelerinde, kuyu patlamaları, buhar hatlarının tahrip olması, türbin arızaları, sızıntılar ve yangınlar gibi çeşitli kazalar meydana gelebilir. Günümüzde, gelişmiş ve hızlı tepkili püskürme önleme sistemleri sayesinde bu tehlikeli sorun büyük ölçüde engellenebilmektedir. Bu tip olaylar endüstriyel kazaların yaşanabileceği bütün tesisler için dikkat edilmesi gereken unsurlardır.

7. TARTIŞMA

Jeotermal enerjiyi diğer yer altı kaynaklarından farklı kılan şey dinamik bir yapıya sahip olmasıdır. Bu nedenle kaynakların aranmasından işletilmesine kadar gelen aşamalar jeotermale özgü ve doğru şekilde tanımlanmalı, koruma, geliştirme, sürdürme hedefleri belirlenmelidir.

Jeotermal kaynaklar, 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ve ilgili hükümleri kapsamında işin tekniğine uygun biçimde aranması, işletilmesi ve denetlenmesi durumunda; çevreye en az zararı veren, sürdürülebilir yerli ve milli bir enerji kaynağıdır. Jeotermal kaynakların araştırılmasına yönelik olarak yapılan jeolojik incelemeler bu kaynağın ülke ekonomisi açısından son derece önemli olduğunu göstermektedir. (Şener vd., 2022). Bu önemli kaynağın potansiyeline ulaşabilmek için üreticisi, tüketicisi, denetleyicisi, araştırmacıları, uygulayıcısı olan tüm aktörler sürece bütünlükle dahil edilmelidir.

Çevreye zararlı etkiler, yanlış uygulamalar ve alınmamış tedbirler sonucunda ortaya çıkan sorunlar, yenilikçi yaklaşımlarla minimuma indirilebilmektedir. Türkiye'deki en öncelikli sorunlardan biri jeotermal sondaj kuyularının mühendislik özelliklerine uygun bir biçimde tasarlanmamasıdır. Jeotermal akışkan bor toksik etkisi olabilecek mineraller açısından zengindir. Söz konusu edilen bu minerallerin çevreye bırakılması ciddi sorunlar meydana getirebilmektedir. Ancak, lityum gibi bu minerallerin ekonomik açıdan karlı olduğunu da belirtmek gerekir.

Elektrikli araçlar, savunma sanayi ve uzay araçlarında lityum kullanımının hızla artmasıyla lityum fiyatları yükselmektedir. Çin'de, şarj edilebilir pil teknolojisinde kullanılan lityum karbonat fiyatları, yılın başından bu yana %276 oranında artmıştır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) raporlarına göre Türkiye, 93,5 milyon ABD Doları gibi önemli miktarda lityum içeren ürün ithal etmekte ve bunun yaklaşık %70'i lityum iyon pillerden, %13'ü ise lityum karbonatlardan oluşmaktadır. Türkiye'de jeotermal sularda lityum çalışmaları devam etmekte olup Batı ve Orta Anadolu bölgelerindeki jeotermal suların ortalama lityum içeriği 10-38 ppm aralığında değişmektedir. Lityumun oluşum mekanizması göz önüne

alındığında Türkiye'deki jeotermal akışkanlarda çok daha yüksek lityum potansiyeli olduğu görülmektedir. Stratejik bakımdan önemli olan bu element, kamusal teşviklerle araştırılmalı ve ülkeye kazandırılmalıdır (Şener ve ark 2022).

Jeotermal enerji konusunda öne çıkan ülkelerin neredeyse hepsinde lityum kazanımı amacıyla pilot tesisler kurulmuştur. Ülkemizde de bu konulara yönelik araştırma çalışmalarının hızla devam ettiği görülmektedir. Bu gibi çalışmaların uygulamaya dönüşebilmesi için ekonomik destekler son derece önemlidir. Jeotermal sistemdeki basınç ve pH dengesinde önemli bir rol oynayan CO₂'yi yeniden enjekte etmek çok önemli bir süreçtir. CO₂ ve H₂S yeraltına verilmesine ilişkin çalışmalar İzlanda gibi bu alanda iyi örnek olan ülkelerde başarılı bir şekilde yürütülmektedir.

Lo et al (2014) ve Mroczek'e göre (2015), yüksek mineral ve metal konsantrasyonuna sahip jeotermal suların içeriğindeki minerallerin geri kazanılması bir yandan önemli bir ticaret fırsatı yaratırlarken, diğer taraftan jeotermal suların kullanımı esnasında meydana gelen korozyon ve kabuklaşma gibi çevresel sorunların etkilerini en aza indirmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Ülkemizin çoğu jeotermal sahalarında kabuklaşma ve korozyon potansiyeli bulunmaktadır. Üretim esnasında sıcaklık ve basıncın azaltılması çözünürlüğü azaltmakta ve kabuklaşmaya sebep olmaktadır. Korozyon ve kabuklaşmayı engellemeye yönelik çalışmaların çoğaltılması, uzun soluklu çevre problemlerinin azaltılmasına katkı sunacaktır.

Şekil 7.1’de Alaşehir’de jeotermal su basmış bir üzüm bağı gösterilmektedir.



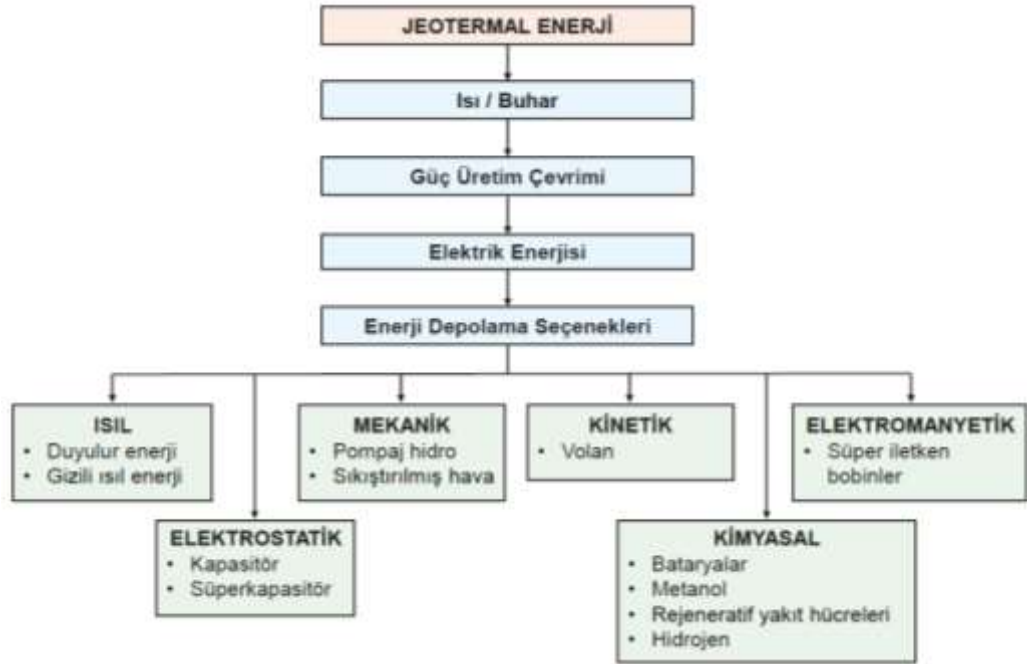
Şekil 7.1. Alaşehir’de jeotermal su basmış bir üzüm bağı (<https://www.hukukihaber.net/alasehirde-uzum-bagini-sicak-su-basti>, Erişim: 14.01.2024)

Jeotermal santrallerde yaşanabilecek kazalara karşı tedbirlerin önceden ve sıkı bir biçimde alınması önemlidir. Bu önlemlere yönelik hassasiyet kurumlara bırakılmamalı yetkililerce sıkı bir biçimde denetlenmelidir. Şekil 7.1’deki Alaşehir’de jeotermal kuyu tahliye havuzunun arızalanarak taşması sonucu yaklaşık 5 dönümlük üzüm bağının sıcak su altında kaldığı görülmektedir. Bu gibi kazaların ardından jeotermal akışkanların özellikleri gereği toprağın yapısında bozulma beklenmektedir.

Santrallerde arıza meydana geldiğinde ya da çalışma durduğunda tesise gelen jeotermal sular acil durum havuzlarına deşarj edilmektedir. Kuyu bölgelerinde bu tür problemlerin üstesinden gelmek için her bir kuyu başına kuyunun bildirilen debisine bağlı olarak en az bir saatlik akışımı karşılayabilecek hacimde deşarj havuzları yapılmalıdır. Böylece arıza ya da test durumlarında jeotermal suların yüzey üstü sulara gönderilmesi engellenebilir (Şener vd., 2022). Öz kaynağımız olan çok değerli tarım topraklarımızın bu gibi kazalardan korunması için işletmelerin gereken önlemleri almaları sağlanmalı ve denetlenmelidir.

sürdürülebilir bir yapı içinde sağlıklı bir yaşam sunmanın tek yolu olarak görülmektedir. Halihazırda yenilenebilir enerji teknolojileriyle birlikte 2050 yılına kadar %100 yenilenebilir enerjiye geçişini tamamlamış bir dünya oluşturabilmek için, bütün yenilenebilir enerji kaynaklarının beraber kullanılması ve depolama tekniklerinin gelişen çağa uygun olması beklenmektedir (Karabağ vd., 2021). Jeotermal enerjinin umut edilen geleceği bu yönde ilerlemektedir.

Özata ve Ölemez (2020), Türkiye’de kamunun yanı sıra özel sektörün de yenilenebilir enerjinin farklı alanlarında yatırımlarını arttırmasıyla beraber Türkiye’nin enerji üretiminin son 20 yılda 4 kattan fazla arttığına işaret etmektedir. Daha çevreci, öz kaynaklarımızı önceliklendiren, ekonomik, yerel ve yöre halkı için pek çok potansiyel taşıyan bir enerji türüdür. Mertoğlu’na göre (2020), jeotermal enerji potansiyelinin çok yönlü kullanımıyla birlikte Türkiye’nin enerjide dışa bağımlılığı büyük ölçüde ortadan kalkacaktır (Dinçer ve Ezan, 2020). Bunun önündeki engellerden biri halkın enerji üretim süreçlerine dâhil edilmiyor olmasıdır. Bunun için kamu organlarının hem halkı hem de özel sektörü bilgilendirmeli ve birleştirici şekilde konumlanmalıdır. Şekil 7.3’te Jeotermal kaynaklı enerji depolama seçenekleri gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Jeotermal kaynaklı enerji depolama seçenekleri (Dinçer ve Ezan, 2020).

Jeotermal kaynaklı enerji üretiminin geleceğini konuşurken muhakkak enerjinin depolanmasından da bahsetmek gerekmektedir. Elde edilen enerjinin verimliliği, güvenliği, ekonomikliği için depolama yöntemlerini sürekli olarak geliştirmek oldukça önemlidir. Örnek olarak Dinçer'e göre (2018), uygun kimyasal dönüşümler yapıldığı takdirde jeotermal kaynaktan üretilen elektrik veya ısı enerjisi kullanılarak hidrojen ve metanol gibi kimyasal yakıtlar elde edildikten sonra farklı bölgelerde veya sektörlerde kullanılabilir biçimde depolanabilmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020).

Başlangıç maliyetlerinin yüksek ve riskli olması yönünden yatırımcıları destekleyici çözümler üretilmesi ülkemizde jeotermal enerji üretiminin artışı için fark yaratacaktır. Bazı ülkelerde devletin riskin yarısını, bazılarında ise tamamını üstlendiği bilinmektedir. Türkiye'de böyle bir uygulama olmadığı için bazı ruhsat sahipleri sondaj aşamasına getirdikleri ruhsatlarını kuyu maliyetleri nedeniyle devretme yolunu seçmekte veya aramadaki 3 yıllık sürenin yetersiz oluşundan kaynaklı üretim sondajı yerine yasanın öngördüğü işletme ruhsatına dönüştürecek akışkan üretime olanak tanınan kuyuları tercih etmektedirler. Teşviklerin olmayışı veya yetersiz oluşunun sektörün gelişmesini önemli ölçüde sınırladığı söylenebilir (Akkuş ve Alan, 2016).

Verimlilik, ekonomiklik ve çevrecilik bir arada sağlanmak istendiği takdirde teknolojiyi yakından takip etmek ve dijitalleşen çağı yakalamak önemlidir. Bir ülkenin kaynaklarına yönelik hafızası ne kadar kuvvetliyse, ölçümler ve veriler ne kadar güncelse, geliştirici faaliyetler de o ölçüde güçlenir. Jeotermal kaynaklara, santrallere, üretim kapasitelerine, geçmiş sondajlara vb jeotermal verilerine dair bütün bilgilerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı programlarda arşivlenmesi, haritalanması/modellenmesi ve değerlendirilmesi, güncel ve doğru bilgi sunmanın önünü açacaktır. Hazırlanan harita ve arşivler uzun süre muhafaza edilebilmekte veya program üzerinden paylaşılarak konu ile ilgili çalışan veya alana katkı sunmak isteyen araştırmacılara, küresel destek mekanizmalarına, yatırımcılara veri tabanı sağlayabilmektedir.

Uzaktan algılamaya dayalı yöntemlerle uydu görüntüleri yorumlanarak hidrotermal alterasyon zonları, yer yüzey sıcaklığı tespit edilmiş; yer yüzey

sıcaklığı anomalisi, jeotermal kaynaklara yakınlık, fay hatlarına yakınlık, drenaj yoğunluğu ve jeotermal formasyon göstergelerine yakınlık parametreleri ile CBS tabanlı Çok Ölçütlü Karar Analizi Yöntemi (ÇÖKA) aracılığıyla potansiyel jeotermal alanlara ulaşılmıştır. CBS-ÇÖKA ve UA ile ayrı ayrı belirlenen alanlar bindirme analizi yöntemiyle bir araya getirildiğinde, tavsiye edilen alanlar daha daraltılarak, hedefe yönelik alanların seçilmesi kolaylaşmıştır (Yalçın, 2016).

Jeotermal kaynak araştırılmasında üretilen bilgilerin dağınık olduğu görülmektedir. Bu sebeple bilgilerin görevlendirilecek bir kamu otoritesi eliyle toplanması, arşivlenmesi, bu bilgilere erişim kolaylığının sağlanması, verilerin Coğrafi Bilgi Sistemlerine aktarılması ve ulusal bir veri tabanının oluşturulması için bu araştırmalarında üretilen bilgilerin, Jeotermal Bilgi Bankası'nda toplanmasını sağlayacak bir düzenlemeye ihtiyaç duyulmaktadır (Akkuş ve Alan, 2016). Böylece hem kaynaklarla ilgili bilgiler hem de araştırmalar bilgi bankasında sunulabileceklerdir.

Birden fazla yenilenebilir enerji kaynağını tek bir tesiste bir araya getiren ve gündüz/gece veya mevsim fark etmeksizin verimli çalışan hibrit enerji sistemlerine yönelik girişimler gün geçtikçe artmaktadır. (Kara vd., 2021). Bu tip uygulamalara iyi bir örnek olarak 2015 yılında Enel Green Power North America, Stillwater'daki türünün ilk örneği olan hibrit tesisi kurması gösterilebilir. İkili çevrim, orta entalpi jeotermal gücün güneş fotovoltaik ve daha yakın zamanda kurulan güneş termodinamik ünitesinin sürekli üretim kapasitesinin kombinasyonunda görülen, yeni endüstri teknolojisine yönelik benzersiz ve oldukça yenilikçi bir örnektir. Santralin toplam kurulu gücü 59 MW olup buna 26 MW'ı güneş, 33 MW'ı jeotermal katkı sağlamaktadır (Şekil 7.4) (Şener vd., 2022).

Bu gibi hibrit, birbiriyle entegre çalışan santrallerin önünün açılabilmesi için yeni metodoloji çerçevesinde santral alanları enerji kaynağı ve teknoloji türü bakımından belirlenebilir ve yatırımcının ihtiyacının üzerinde bir alanın kamulaştırılmasının önüne geçilebilir. Atıl kalan yüzlerce dönümlük alanlar da enerji üretiminin bir parçası haline getirilebilecektir. (Şener vd., 2022).



Şekil 7.4. Jeotermal ve güneş enerjisi ile hibrit uygulama örneği (Şener vd., 2022).

Jeotermal enerji alanları çok sayıda endüstriyel entegreye uygundur. Kırsal bölgelerdeki jeotermal santrallerde bölgedeki tarımsal kalıntı ve atıklar kullanılarak biyokütleyle dayalı yardımcı kaynak birimleri de kurulmasının önü açılacak ve bu da elektrik üretiminin artmasını sağlayacaktır.

Bütün bu geliştirici çalışmalar yapılırken çevrenin korunumuna ve atık yönetimine de dikkat edilmelidir. Buna iyi bir örnek Endonezya'dan verilebilir. Jeotermal sanayi kuruluşları katı atıklarını katı atık yönetimi hiyerarşisine göre yönetir. Bu da; 'azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür' temel prensipleri şeklindedir. Endonezya jeotermal sahası, organik atıklarını genellikle kompostlama yoluyla yönetir. Diğer tehlikeli olmayan atıklar ise geri dönüştürülmek veya yeniden kullanılmak üzere atık bankasına veya çevre topluluğuna teslim edilir (Şekil 7.5). Tehlikeli atıkları üçüncü şahıslarla yönetilmekte ve ayrıca nihai bertaraf sahasında toplamaktadırlar (Şener vd., 2022).



Şekil 7.5. Endonezya Wayang Windu’da katı atık yönetim sistemi (Şener vd., 2022).

Jeotermal kaynaklar tıp, sağlık ve spor alanlarında etkin olarak kullanılmaya başlamıştır. (Dinçer ve Ezan, 2020: 49) Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Başkanlığı tarafından yürütülmekte olan “Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşma” programı kapsamında jeotermal ve tarım alanında hazırladığı projelerle, pilot üniversitelerden biri seçilmiştir. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, bünyesinde halen jeotermal kaynaklar barındıran ve bunu bir Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Merkezi’nde tedavi amaçlı olarak kullanan ülkemizdeki birkaç üniversiteden biridir. Türkiye’de birçok jeotermal kaynak, ticari faaliyet gösteren kaplıca kürü amaçlı oteller tarafından veya halk tarafından sadece ilkel banyolar biçiminde kullanılmakta ve jeotermal kaynaklar uygun bir katma değer meydana getirilemeden israf edilmektedir. Oysa, jeotermal kaynakların sağlık ve tedavi amaçlı kullanım değeri, kaplıca turizmi ve rekreasyonel amaçlı kullanım değerinden çok daha fazladır.

Şekil 7.6’da gösterilen hedefler ülkemizde jeotermal enerji konusunda en etkin aktörlerden biri olan MTA’nın paylaştığı hedeflerdir. Bu hedeflerin her biri çevreci bir yaklaşımla uygulanmadıklarında ne yazık ki çevresel riskler barındırmaktadır. Bununla birlikte uygulayıcıların ve denetleyicilerin doğa dostu yaklaşımları riskleri minimize edecek güçtedir.

MTA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ JEOTERMAL ENERJİDE YENİ HEDEFLER	
TÜRKİYE JEOTERMAL ENERJİ MASTER PLANI	
1-2 YIL KISA VADE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Türkiye Jeotermal Euvanterinin Oluşturulması, 2. Jeotermal İsa Akısı Haritasının Güncellenmesi, 3. Jeotermal Yatırım Rehberinin Hazırlanması,
1-3 YIL ORTA VADE	<ol style="list-style-type: none"> 4. Batı Anadolu Dışındaki Bölgelerimizde Jeotermal Potansiyelin Ortaya Konulması, Özellikle Doğu Anadolu Bölgesinde (Van, Ağrı, Bingöl, Malatya (?), Elazığ (?), vb.) / GDA Bölgesi (Şırnak, Batman (?)) ve İç Anadolu Bölgesinde (Akıncı, Niğde, Nevşehir, Kırşehir, Ankara (?) vb.) 1'er adet Jeotermal Elektrik Santrali Potansiyeli Keşfi 5. Bölgesel Isıtmanın Türkiye Genelinde Yaygınlaştırılması, 6. Jeotermal Arama Faaliyetleri ve Üretim Testleri Gerçekleştirilmesi Amacıyla Terk Edilmiş ve Üretimi Sonlanmış Ham Petrol ve Doğal Gaz Arama ve Üretim Kuyularının MAPEG'ten Kuyu Kullanım İzinleri Bakan Olur'u ile Temin Edilmesi ve Pilot Uygulamaya Geçilmesi, 7. Ham petrol ve doğal gaz üretimleri ile birlikte gelen sıcak akışkanın, reinjeksiyon kuyularına deşarj edilmeden önce bölgede sera-termal amaçlı olarak pilot ölçekli kullanımlarının yaygınlaştırılması,
2-5 YIL UZUN VADE	<ol style="list-style-type: none"> 8. Kızgın Kuru Kaya Potansiyelinin Ortaya Konulması ve Bu Kapsamda Bakanlığımız Himayesinde Seçilecek Pilot Bölgede Özel Sektör-MTA İştiraki ile Pilot Ölçekli Çalışmaların Başlatılması, 9. Jeotermal Kaynaklardaki Lityum ve Diğer Elementlerin Potansiyelinin Ortaya Konulması, 10. Jeotermal Faaliyetlerde Kullanılan Ekipmanlarda Yerleştirme Çalışmaları Başlatılması ve Geliştirilmesi

Şekil 7.6. MTA Genel Müdürlüğü'nün jeotermal enerjide hedefleri (Taşkıran, 2023).

Ülkemiz için önemli potansiyeller taşıyan bu doğal kaynağın etkin ve çevre dostu uygulamalarla bölge halkının da talepleri dikkate alınarak bütüncül bir kalkınma hedefiyle değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple, atılacak tüm adımların ve geleceğe yönelik tüm planlamaların, konuyla ilgili bilim insanları, sektör temsilcileri, ilgili kamu ve özel kurumların temsilcileri ve farklı STK'ların görüşleri dikkate alınarak oluşturulması doğru bir yaklaşım olacaktır (Dinçer ve Ezan, 2020).

8. SONUÇ

Jeotermal enerji kaynakları yeni, yenilenebilir, çevre dostu ve özvarlığımızdır. Jeotermal enerji, ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltarak ulusal enerji güvenliğini güçlendiren bir ulusal kaynaktır. Jeotermal enerjinin kullanımında insan ve çevrenin korunması öncelikli olmalıdır. Bu nedenle, jeotermal enerjinin insan sağlığına ve çevreye olası olumsuz etkilerinin dikkatlice incelenmesi ve yerel halk bu konuda bilgilendirilmesi gerekmektedir.

Yapılan araştırmalar ışığında jeotermal enerjinin çevreyi olumsuz etkilediği durumlara bakıldığında akışkanların re-enjeksiyonunda yaşanan sorunlar ve ihmaller en sık karşılaşılan sebepler olmuştur. Jeotermal suların kendilerine has özellikleri ve taşıdıkları minerallerin içme suyu, tarımsal sulama suyu ve tarım topraklarıyla buluşması en büyük zararı vermektedir. Diğer yandan da bu doğal kaynağın sürdürülebilirliği tehlikeye girmektedir. Jeotermal kaynakların kendini yenileyebilecek uygulamalarla kullanımının mümkün hale getirilmesi bir zorunluluktur. Aksi takdirde, insanlık için son derece önemli bir potansiyele sahip bu kaynakların zaman içerisinde potansiyellerinde önemli düşüşler gözlenecektir. Oysaki doğru mühendislik uygulamalarıyla, eğitimlerin ve denetimlerin güçlendirilmesiyle bunun önüne geçilebileceği ortaya konmuştur. Santrallerin çalışması sırasında, jeotermal akışkanın (sıvı+NCG) tamamının re-enjeksiyonunu garanti edebilen teknolojilerin, atmosferik ortamdaki emisyonları önlemek için etkili yöntemler olduğu bulunmuştur. Çalışma içerisinde bu riskleri minimuma indiren ülkelerden iyi örnekler paylaşılmıştır.

Her geçen gün kalabalıklaşan ve dijitalleşen dünyanın enerji talebini azaltması gerçekçi bir hedef değildir. Öyleyse enerji arzını artırmak ve sürdürülebilirlik için bunu doğa dostu, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamak gerekmektedir. Sürdürülebilir gelişme, çevreyi ve toplumu korumayı amaçlayan ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmayı sağlayan temiz enerji kaynaklarının kullanımıyla mümkün olacaktır. Dolayısıyla enerjinin sürdürülebilirliği çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan bir ülkenin kalkınmasının ve sürdürülebilirliğin temel unsurlarındandır.

Bütün dünyayı ilgilendiren enerji arzı ve kaynakların sürdürülebilirliği konusunda, uluslararası, ulusal ve yerel tüm aktörler birlikte ve çevreci bir yaklaşımla hareket etmelidir. Paris Anlaşması'nda da vurgulandığı üzere sanayi devrimi öncesi dönemle karşılaştırıldığında küresel ısınmanın mümkün olduğunca 2 °C'nin altında tutulması için dünya genelinde birincil enerji kaynak kullanımında geleneksel karbon bazlı enerji kaynaklarını terketmek bir zorunluluk haline gelmiştir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, S. ve Köseoğlu, H.**, 2021, Jeotermal Suların Uygulama Alanları ve Çevresel Problemler, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı (28): 325-332 s.
- ADÜTEM**, 2015, Jeotermal Enerjinin Çevresel Etkileri, ADÜ Rektörlüğü Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi Yayınları, Aydın, 17s.
- Akkuş, İ. ve Alan, H.**, 2016, Türkiye'nin Jeotermal Kaynakları, Projeksiyonlar, Sorunlar ve Öneriler Raporu, TMMOB Jeoloji Müh. Odası, Ankara, 76s.
- Akkuş, İ.**, 2020, TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, “Türkiye’de Jeotermal Enerji Gerçeği: Potansiyel ve Sorunlara Genel Bir Bakış”, Sunum Dokümanları ve Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 24 s.
- Armannsson, H. and Kristmannsdottir, H.**, 1992, Geothermal Environmental Impact, *Geothermics* 21(5/6), 869-880pp.
- Baba, A.**, 2020, Jeotermal Kaynakların Çevresel Etkileri ve Bunlara Yönelik Yenilikçi Teknikler, TÜBA-Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Baba, A. and Armannsson, H.**, 2006, Environmental Impact of the Utilization of Geothermal Areas, *Energy Sources Part B*. (1): 267-278 s.
- Bundschuh, J. Prakash Maity, J., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., R. Kulp, T., Jiin-Shuh, J., Kar, S., Huai-Jen, Y., Yu-Jung, T., Bhattacharya, P. and Chien-Yen, C.**, 2013, Naturally occurring arsenic in terrestrial geothermal systems of western Anatolia, Turkey: Potential role in contamination of fresh water resources, *Journal of Hazardous Materials*, 262; 951–959.
- Canik, B., Çelik, M. ve Arıgün, Z.**, 2000, Jeotermal Enerji, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara, 60s.
- Çermikli, E.**, 2020, Application of Membrane-Based Novel Hybrid Separation Processes for Reclamation of Geothermal Water, MSc Thesis, Ege Uni. Graduate School of Applied and Natural Science, 145p (unpublished).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çetin, R. Ş. ve Tarcan, G.,** 2023, Mineral Recovery Possibilities in High Temperature Geothermal Fluid in Western Anatolia, GT'2023 Geothermal Turkey, Ankara.
- Çiftçi, D. İ., ve Meriç. S.,** 2020, Jeotermal Sularda Lityum Oluşumu ve Geri Kazanımı, 3. Çevre Mühendisliği Kaynak Geri Kazanım Uluslararası Kongresi Tam Metin Sözel Sunumlar 29-37 s.
- Dickson, M. H. and Fanelli, M.,** 1995, Geothermal Background, 1-38 Geothermal Energy, Dickson, M. H. and Fanelli, M. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, 214p.
- Dinçer, İ. ve Ezan, M.A. (ed.),** 2020, TÜBA Jeotermal Enerji Teknolojileri Raporu, Türkiye Bilimler Akademisi, Ankara, 122s.
- Erkul, H.,** 2012, Jeotermal Enerjinin Ekonomik Katkıları ve Çevresel Etkileri: Denizli-Kızıldere Jeotermal Örneği, *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10(19): 1-30s.
- Hunt, T.M.,** 2000, Five lectures on environmental effects of geothermal utilization, The UN University, Reports Number 1, 9-22 pp.
- Jeotermal Enerji Derneği,** Küresel Enerji Kullanımı, <https://www.lovegeothermal.org/wp-content/uploads/IGA-Brosur-01.03.2023.pdf> (Erişim tarihi 13 Ocak 2024)
- Kagel, A., Bates. D. and Gawell. K.,** 2005, A Guide to Geothermal Energy and the Environment, Geothermal Energy Association.
- Kara, M., Ercan, Y., Yumuşak, R., Cürebal, A. ve Eren, T.,** 2022, Yenilenebilir Hibreti Enerji Santrali Uygulamasında Tesis Yer Seçimi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 208-227s.
- Karabağ, N., Çobanoğlu Kayıkcı, C. B. ve Öngen, A.,** 2021, %100 Yenilenebilir Enerjiye Geçiş Yolunda Dünya ve Türkiye. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 230-240.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü**, “Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları” <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari> (Erişim tarihi 13 Ocak 2024)
- Nakahara. H., Yanokura. M. ve Murakami Y.**, 1978, Environmental Effects of Geothermal Easte Water on the Nearby River System, Journal of Radioanalytical Chemistry Vol:45 25-36 s.
- New Zealand Geothermal Association**, <https://www.nzgeothermal.org.nz/> (Erişim tarihi 13 Ocak 2024)
- Özbektaş. S., Şenel. M. C. ve Sungur. B.**, 2023, Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri, Mühendis ve Makine Dergisi: 64, 317-351 s.
- Özbey Ünal, B.**, 2019, Jeotermal Sulardan Bor Giderimi İçin Yenilikçi Hidrofobik Membran Distilasyonu Membranlarının Üretilmesi ve Proses Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üni, Fen Bilimleri Enstitüsü, 280s (yayımlanmamış).
- Poyraz, G.**, 2016, Aydın Buharkent Yöresinde Jeotermal Sularla Sulanan Toprak ve Bitki Örneklerinde Bazı Kirletici Parametrelerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, 143s (yayımlanmamış).
- Rabet, R.S., Simsek, C., Baba, A. and Murathan, A.**, 2017, Blowout mechanism of Alasehir (Turkey) geothermal field and its effects groundwater chemistry, Environ Earth Sci (2017) 76:49
- Rybach. L.**, 2003, Geothermal Energy: Sustainability and the Environment, Geothermics (32): 463-470pp.
- Sowizdal, A., Chmielowska, A., Tomaszewska, B., Operacz, A. and Chowaniec, J.**, 2019, Could geothermal water and energy use improve living conditions? Environmental effects from Poland, Archives of Environmental Protection, 45(3), 109-118pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Stober, I. and Bucher, K.**, 2013, Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development, Springer, Heidelberg, 291p.
- Sür, Ö.**, 1970, Jeotermal Enerji, *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih_Coğrafya Dergisi*, 28(3-4): 1-37 s.
- Şener. M. F., Baba. A., Uzelli, T., Akkuş, İ. ve Mertoğlu, O.**, 2022, Türkiye Jeotermal Kaynakları Strateji Raporu.
- Şimşek, C. ve Gündüz, O.**, 2017, Jeotermal Suların Çevreye Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Önlemler, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 53-61 s.
- Xia, L. and Zhang, Y.**, 2019, An overview of world geothermal power generation and a case study on China-The resource and market perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 411-423.
- Taşkıran, L.**, 2023, Jeotermal Enerji Alanında Yapılan Çalışmalar, Jeotermal Enerji Kullanımı, Potansiyellerimiz ve Yeni Hedefler, GT'2023 6. Türkiye Jeotermal Kongresi, 7-8 Mart 2023, Ankara.
- Yalçın. M.**, 2016, Jeotermal Alanların CBS ve Uzaktan Algılama Teknikleri ile Araştırılması: Akarçay Havzası (Afyonkarahisar) Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim dalı 151 s.(yayımlanmamış)
- Yanar, P.**, 2015, Ege Bölgesi Jeotermal Sularında Lityum, Bor ve Arsenik Düzeylerinin İncelenmesi ve Bu Elementlerin Jeotermal Sulardan Seçimli Olarak Ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, 170s (yayımlanmamış).
- Yılmaz, N. S.**, 2013, Aydın ve Çevresindeki Jeotermal Sulardaki Bazı Elementlerin ve İyonların ICP-OES ve IC ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, 78s (yayımlanmamış).
- Yılmaz. E. A. ve Öziç. H. C.** 2018, Ordu Üni. Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 8(3), 525-535 z.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının gerçekleőtirilmesinde katkıları ve desteklerini esirgemeyen, baőtta danıőmanım Prof. Dr. Sezai Delibacak ve değerli jüri üyeleri olmak üzere, kıymetli eőtım Dr. Öğr. Üyesi C. Sinan Altundağ'a ve yaőtam boyu destekçim olan aileme teőtekkür ederim.

Çalıőmamı, lisansüstü eğitimime devam ettiğim sırada dünyaya gelen, geleceğe dair umudumu ve alıőtma gücümü hep taze tutan oğlum Kemal Ege Altundağ'a, daha yeőtıl, daha adil, daha insancıl bir dünyada yaőtaması dileklerle, ithaf ediyorum.

07 / 02 / 2024

Gaye HÜR CAN ALTUNDAĞ

ÖZGEÇMİŞ

Gaye Hürcan Altundağ ilk, orta öğrenimini İzmir'de tamamladı. 2020 yılında Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümünden mezun oldu ve aynı yıl Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yüksek lisans eğitimine devam ederken bir yandan Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Coğrafi Bilgi Sistemleri önlisans programını tamamlamıştır. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.

