

## Jeotermal Enerji Kaynaklarının Çevresel Etki Değerlendirmesi

Züleyha REÇBER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Iğdır Üniversitesi, Türkiye

\*[zuleyha.bingul@igdir.edu.tr](mailto:zuleyha.bingul@igdir.edu.tr)

**Özet** – Enerji, modern yaşamın tüm yönlerini etkilemekte ve bir ülkede kişi başına düşen enerji kullanımı ile kişi başına düşen verimlilik ve yaşam beklentisi arasında güçlü bir bağ bulunmaktadır. Bu küresel ölçekte enerji talebini, özel olarak da elektriğe olan talebi artırmaktadır.

Fosil yakıtlar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle dünya çapında kullanılan birincil enerji kaynağıdır. Ancak kaynakları sınırlı olan fosil yakıtların kullanımı büyük miktarlarda metan, karbondioksit ve nitröz oksit gibi sera gazlarının açığa çıkmasına neden olmakta, iklim değişikliği ve küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir, temiz, çevre dostu ve verimli alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji sektörünün karbondan arındırılması, iklim değişikliğiyle mücadele ve atmosfere ve çevreye zarar vermeden teknolojik gelişmelere olanak sağlanması açısından hayati bir öneme sahiptir. Ancak güneş, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisinin kullanılabilirliği, hava koşullarına ve gelecekteki iklim değişikliklerine bağlıdır.

Jeotermal enerjinin çevre ve iklim değişikliğine karşı daha az hassas olması enerji geçişinde önemli bir rol oynamakta ve son yıllarda ısıtma temini ve elektrik üretimi amacıyla kullanımı düşük karbon emisyonları nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır. Jeotermal enerji temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilse de, geliştirilmesi ve işletilmesinden kaynaklanan bir miktar gaz ve atık su emisyonu çevresel endişelere neden olmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma jeotermal enerjinin çevresel risklerini niteliksel olarak değerlendirerek genel bir bakış sunmaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Jeotermal Enerji, Yenilenebilir Enerji, Hava Kirliliği, Su Kirliliği, Atık Yönetimi*

### I. GİRİŞ

Nüfus artışı, teknolojik ilerlemeler ve ekonomik büyüme, küresel enerji talebindeki artışın temel itici güçleridir. Fosil yakıtlar sürdürülebilir olmamasına ve ciddi çevre ve sağlık sorunlarına sahip olmasına rağmen hala enerji sektörüne en büyük katkıyı sağlayan kaynaklardır [1]. Fosil yakıtların kullanımı kabul edilemez düzeylerde sera gazı emisyonlarının açığa çıkmasına neden olmakta [2] ve küresel ısınma, iklim değişikliği, deniz seviyesinin yükselmesi, su baskınları gibi önemli çevresel sonuçları katlanarak artmaktadır [3], [4]. Bu nedenle fosil yakıt kullanımını azaltmak veya ortadan kaldırmak için dünya çapında enerji stratejileri gözden geçirilmekte ve farklı yöntemler önerilmektedir. Mevcut teknolojilerin verimliliğinin artırılması, verimli ve çevresel etkileri daha düşük

yeni cihazların geliştirilmesi ya da kısmen veya tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş önerilen farklı yöntemlerdir. İkincisi, yani yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, fosil yakıtların kullanımını önemli ölçüde azaltabileceği ve hatta fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldıracabileceği için en cazip yöntemdir [5], [6].

Yenilenebilir enerji, sürekli yenilenen doğal kaynaklardan elde edilen enerjidir ve doğrudan güneşten, rüzgârdan, yağmurdan, okyanus gelgitlerinden, biokütleden ve jeotermal kaynaklardan üretilir [7]. Yenilenebilir enerji, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olduğundan iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir araç olarak kullanılmakta [8] ve küresel enerji üretim kapasitesinin yaklaşık %28'ini oluşturmaktadır [9].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal kaynaklar, mevsimsel, iklimsel ve coğrafi koşullardan bağımsız olması nedeniyle güvenilirdir [10]. Jeotermal enerji, iklim değişikliği tehdidini hafifletme konusunda henüz kullanılmayan potansiyele sahip bir enerji kaynağıdır [2].

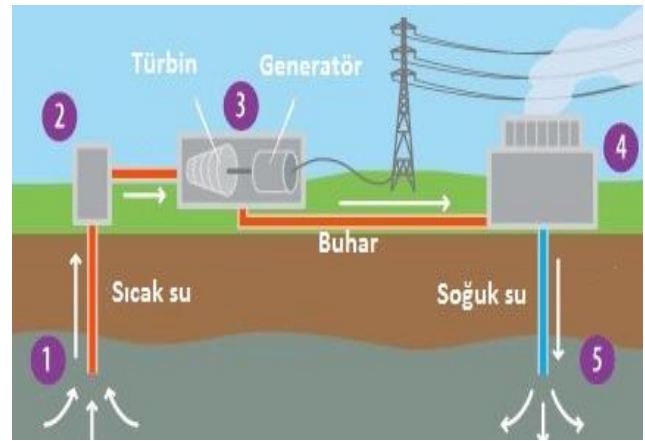
Jeotermal enerjinin çevresel etkileri, geleneksel fosil kaynaklarla karşılaştırıldığında düşük olmasına rağmen [11] akışkan yönetimi, ele alınması gereken bir çevresel sorundur [12], [13] ve belirli projelerin uygulanması sırasındaki endişeler, jeotermal enerji projelerinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi için özel çerçevelerin geliştirilmesine yol açmaktadır [14]. Jeotermal enerjinin doğrudan çevresel etkileri arazi kullanımı, atmosferik emisyonlar, su tüketimi, katı atıklar ve sahaya bağlı olarak biyolojik çeşitliliğe yönelik spesifik tehditlerden oluşmaktadır [15]. Bu çalışmada, jeotermal enerjinin çevresel etkileriyle ilgili bilgi tabanımızdaki boşluğu doldurmak ve geleneksel fosil yakıtlar ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre faydalarını değerlendirmek amaçlanmaktadır.

## II. JEOTERMAL ENERJİ

Jeotermal kaynak, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, kimyasallar içeren buhar, sıcak su ve gazlardır. Jeotermal enerji ise jeotermal kaynaklardan doğrudan veya dolaylı her türlü faydalanmayı kapsamaktadır [16]. "Jeotermal enerji" terimi Yunanca "jeo" (toprak) ve "termo" (ısı) kelimelerinden alınırken, "energos" aktif anlamına gelir. Bu nedenle, genel terim, aktif ısı enerjisinin dünya içindeki hareketi olarak adlandırılabilir [17].

Dünyanın sıcaklığı derinlikle birlikte artmakta ve bu jeotermal eğim, dünyanın çekirdeğinden yüzeye sürekli ısı iletimi sağlamaktadır. Jeotermal enerji, dünyanın çekirdeğinden gelen bu ısı akışına dayalı, karbon içermeyen, büyük potansiyele sahip, güvenilir ve bol miktarda olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır [18]. Jeotermal süreç, ısmıyı yeraltında hapsetmeyi, ardından yüzeye yakın yerlerde ısı şeklinde yükselen enerji oluşturmayı içermektedir. Bu ısı doğal olarak sıcak su veya buhar oluşturduğunda, elektrik üretmek üzere buhar türbinini döndürmek için kullanılmaktadır [19], [20]. Şekil 1'de jeotermal enerji üretimi şematik olarak gösterilmişken, Şekil 2'de jeotermal enerji santraline ait bir görüntü yer almaktadır.

Temel olarak buhar ağırlıklı ve sıvı ağırlıklı olmak üzere iki tür jeotermal sistem vardır. Buharın hakim olduğu sistemler rezervuarda su ve buharın bir arada bulunması nedeniyle nadirdir. Jeotermal sistemlerin çoğunluğu sıvı ağırlıklı tiptedir. Bu tip sistemlerde ortalama sıcaklığı 200 °C olan, 2-10 MW aralığında elektrik enerjisi üretebilen rezervuarlar bulunur. Genellikle orta ila yüksek sıcaklık aralığına sahip aktif tektonik ortamlarda bulunurlar. Bu nedenle çoğu volkanik zincirlerin yakınında bulunabilir. Bu sistemlerdeki kayalar doğal olarak sıvı akışını destekleyecek şekilde şekillendirilmiştir [17].



Şekil 1. Jeotermal enerji santrali [21]

Yağmur, kar, deniz ve magmatik suların yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayaç kütlelerini besleyerek oluşturdukları jeotermal rezervuarlar, yeraltı ve re-enjeksiyon koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korurlar. Yüksek enerji yoğunluğu ve kısa süreli atmosferik koşullardan etkilenmemeleri, jeotermal enerjiyi güneş ve rüzgâr enerjisine göre son derece cazip hale getirmekte ve avantaj sağlamaktadır. Ancak ulaşım kısıtlamaları gibi sınırlamaları bulunmaktadır [16], [17].



Şekil 2. Jeotermal enerji santrali (16)

Genel olarak küresel enerji üretiminde jeotermal enerjinin payı %0,3 olmakla birlikte bazı ülkelerde önemli bir rol oynamaktadır. Küresel ölçekte jeotermal enerjinin toplam kurulu kapasite olarak en büyük olduğu ülkeler ABD, Endonezya, Filipinler ve Türkiye'dir [19].

#### A. Jeotermal Enerjinin Uygulama Alanları

Jeotermal enerjinin temel uygulamaları şu şekilde sıralanabilir [7], [17]:

**1. Elektrik üretimi:** Elektrik üretimi için sıcak su ve buhar bazlı derin jeotermal kaynaklardan yararlanılmaktadır.

**2. Doğrudan kullanım:** Doğrudan kullanımda sığ jeotermal ısı pompası sistemleri yeryüzünde depolanan ısıyı çekmeden iklimlendirme ve ısıtma sağlamaktadır. Binaların veya seraların ısıtılması, merkezi ısıtma, merkezi soğutma ve gıdaların kurutulması gibi ısıtma/soğutma uygulamalarını içermektedir.

**3. Toprak kaynaklı ısı pompaları:** Bu uygulama, ısı kaynağı olarak yüzey toprağının kullanıldığı binalarda ısıtma ve soğutma amaçlı uygulamaları içermektedir.

**4. Kimyasal madde ve mineral üretimi:** Karbondioksit, gübre, lityum, ağır su, hidrojen gibi kimyasal maddelerin ve minerallerin üretimini içermektedir.

**5. Turizm amaçlı kullanım:** Termal turizmde kaplıca amaçlı kullanılmaktadır.

**6. İçme suyu üretimi:** Mineraller içeren içme suyu üretimini içermektedir.

**7. Kültür balıkçılığı:** Kültür balıkçılığı düşük sıcaklıklarda (30 °C'ye kadar) yapılmaktadır.

### III. JEOTERMAL ENERJİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Jeotermal enerjinin çevresel etkileri, geleneksel fosil kaynaklarla karşılaştırıldığında düşük olup çevre dostu ve temiz bir enerjidir. Bununla birlikte hiçbir teknoloji çevresel etkiden muaf değildir. Jeotermal enerji kaynaklarının çevresel etkilerinde, yeraltının jeolojisi ve yapısının yanı sıra rezervuar tipi de önemli bir rol oynamakta ve bu özelliklere bağlı olarak bir jeotermal enerji santralinden diğerine önemli ölçüde farklılık göstermektedir [11].

#### A. Hava Kirliliği

Derin basınçlı sıcak su kaynakları genellikle bileşiminde CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> ve CH<sub>4</sub> bulunan çözünmüş gazlar içerir. Bunlar, basıncın

düşürülmesi ve soğutulması sırasında açığa çıkar ve SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi oksidasyon ürünleri üretir. Civa, bor, arsenik ve diğer metallerin tuzları da dahil olmak üzere çözeltideki metal tuzları, ya jeotermal tuzlu su havuzlarında çökerek bertaraf edilmesi gereken boru tortusu oluşturabilir ya da ince taneli partikül madde olarak soğutma kulelerinden atmosfere salınabilir [17], [22].

Jeotermal santrallerde atmosfere salınan kirletici emisyonlarında ana bileşen CO<sub>2</sub>'dir, ancak doğal gaz, petrol veya kömürle çalışan elektrik santrallerinde üretilen rakamların oldukça altındadır [18]. Jeotermal santrallerden yayılan CO<sub>2</sub>'nin enerji üretimi tarafından yaratılmadığı, zaten yavaş yavaş yeryüzüne atılan CO<sub>2</sub> olduğu da belirtilmektedir [11]. Volkanik arazilerde yapılan araştırmalar, jeotermal sahaların gelişiminin bu arazilerden yayılan toplam CO<sub>2</sub> üzerinde hiçbir fark yaratmadığını güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır [23].

Hidrojen sülfür, jeotermal santrallerde en büyük endişe kaynağı olan hava kirleticidir. Emisyonları genellikle 0,5 ile 6,8 g/kWh arasında değişmektedir. H<sub>2</sub>S önce sülfür dioksite, sonra da sülfürik asite oksitlenir ve asit yağmurlarına neden olabilir. Ancak jeotermal santrallerden salınan H<sub>2</sub>S emisyonu ile asit yağmuru arasında doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır [18]. Hidrojen sülfür, hoş olmayan bir kokuya sahiptir ve orta konsantrasyonlarda toksiktir [11].

Metan ozon tabakasına zararlıdır ve kısa vadeli yüksek sera gazı etkisine sahiptir [2]. Bor, amonyak ve civa, yağmurla atmosferden sızarak toprak ve bitki örtüsünün kirlenmesine yol açar. Özellikle bor bitki örtüsü üzerinde ciddi bir etkiye sahip olabilir. Bu kirletici maddeler aynı zamanda yüzey sularını ve sudaki yaşamı da etkileyebilir. Besin zincirine giren civa ve arsenik insan sağlığı açısından bilinen risklerdir. Jeotermal enerji santrallerinden kaynaklanan civa emisyonlarının 45 ila 900 µg/kWh arasında değiştiği ve kömür yakıtlı enerji santrallerinden kaynaklanan civa emisyonlarıyla karşılaştırılabilir düzeyde olduğu bildirilmektedir. Amonyak, 57 ila 1938 mg/kWh arasındaki konsantrasyonlarda atmosfere deşarj edilmekte, ancak atmosferik işlemler nedeniyle hızla dağılmaktadır [18].

#### B. Arazi Kullanımı

Jeotermal enerji santralleri diğer yenilenebilir enerjilerden daha az arazi gerektirse de, genellikle

milli parklar veya turistik alanların içinde veya yakınında yer aldığından ve aynı zamanda tarihi açıdan da ilgi çekici olabileceğinden arazi kullanımı sorunları jeotermal enerjinin gelişimini ciddi şekilde kısıtlamaktadır [24].

Arazi kaynakları özellikle tropik bölgelerde jeotermal projelerden etkilenebilir [25]. Bu projelerin alanları, jeotermal enerji santralleri ve binalarını, arama ve üretim kuyularını ve yardımcı tesislerini kapsamakta ve çevredeki alanların peyzaj düzenini bozarak görsel kirliliğe neden olmaktadır [26]. Jeotermal enerji santrallerinin neden olduğu görsel etkiyi en aza indirmek için doğal peyzajla uyumlu tesis ve malzeme kullanılmalıdır [2].

Jeotermal enerji santrallerinde, sondaj sırasında yüzey bozuklukları meydana gelmekte, ancak sondaj tamamlanıp sondaj makineleri kaldırıldığında, göletler kurutulduğunda ve arazi yeniden şekillendirildiğinde bu bozulmalar çoğunlukla ortadan kalkmaktadır. Kazı, inşaat ve yeni yolların yapılmasından kaynaklanan yüzey bozuklukları da olmakla birlikte, söz konusu alan nispeten küçüktür [11].

### C. Jeolojik Tehlikeler

Jeotermal enerji gelişimine genellikle jeotermal rezervuardaki basınç veya sıcaklıktaki değişiklikler eşlik eder. Bu durum, özellikle gelişmiş jeotermal sistemleri benimseyen bölgelerde, kullanılan jeotermal alanlarda zemin deformasyonuna ve çökmeye, fayların yeniden aktivasyonuna ve mikro-depremselliğe neden olur [27].

Kabuğun altındaki basınç, jeotermal faaliyetler için jeoakışkanların çıkarılmasıyla azalır [28]. Jeotermal sahadan akan sıcak su/buhar ve enjekte edilen akışkana karşı toprağın farklı tepkileri nedeniyle zemin çatlamaya maruz kalabilir [4]. Daha sonra kayalar kabuğun alt seviyelerinde sıkışır ve aşağıya doğru düzgün bir şekilde hareket eder ve çökme meydana gelebilir. Arazi çökmesi olarak adlandırılan bu olay çoğunlukla genç jeotermal sahalarda bulunan akışkan alanlarda meydana gelir [29].

Jeotermal enerjinin kullanımı aynı zamanda fayların yeniden aktivasyonunu ve sismisiteyi de tetikleyebilir. Jeotermal santrallerin kuyularına sıvı çekilmesi ve enjekte edilmesi daha düşük kaya sıcaklığına ve daha yüksek boşluk suyu basıncına yani yeraltında strese neden olmakta, bu da bu gerilmeleri zemine aktararak sismisiteyi oluşturmaktadır [30]. Enjekte edilen su ile çevredeki

kayalar arasındaki sıcaklık farkı ne kadar yüksek olursa, termal büzülme basıncı da o kadar yüksek olur ve dolayısıyla sismik olayların büyüklüğü de o kadar belirgin olur [31].

Sismik oluşum mekanizması dört adımdan oluşmaktadır [32], [33]:

1. Boşluk suyu basıncını arttırmak (etkili normal gerilmeyi azaltmak ve bir fayın sürtünme direncini azaltmak)

2. Sıcaklığın azaltılması (sıcak rezervuar kayasına soğuk bir çalışma sıvısı enjekte edildiğinde termal gerilmeler oluşur ve boşluk basıncını artırır)

3. Sıvının hacminin değiştirilmesi;

4. Kırılma yüzeylerinin kimyasal değişimi (doğal olmayan sıvılar rezervuarlara enjekte edildiğinde kimyasal değişime neden olur).

Ayrıca sıvı akış hızı da oluşturulan sismik yapının boyutunu etkileyen bir parametredir.

Heyelan terimi genel anlamda yerçekimi etkisi altında yokuş aşağı kütle hareketidir [34]. Jeosıvının jeotermal enerjilerde doğrudan kullanımı akış ısısını ve bölgesel suyu değiştirmekte ve çökeltilerin dengesini bozmaktadır. Tüm bu durumlar jeotermal kaynaklardaki heyelanları simüle etmektedir [35]. Jeotermal alanlar sıklıkla pomza gibi volkanik kayalarla ilişkili olduğundan ve jeotermal alanlardaki toprak ve üst temel sıklıkla termal olarak değişime uğradığından heyelanlar meydana gelmektedir [11]. Ayrıca jeotermal alandaki sıvı dolaşımı ve gerilimli zemin oluşumunda sıvı basıncındaki değişim, kaya kırılmasına neden olmaktadır [4].

### D. Gürültü

Jeotermal enerji santrallerinde inşaat ve işletme aşamasında kullanılan makine ve ekipmanlardan kaynaklanan gürültü oluşmaktadır [4]. İnşaat aşamasında oluşan gürültü, sondajdan ve sondaj kuyu açma mekanizmalarından kaynaklanıyorken, işletme aşamasında ortaya çıkan gürültü, jeneratörler, türbinler, soğutma kulesi, fanlar, pompalar, tüplerin içindeki sıvının hareketi ve taşıma gibi ekipmanlardan kaynaklanmakta ve potansiyel bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Jeotermal santrallerde en büyük gürültü kuyu açma ve kuyu test aşamasındadır [11], [36]. Kuyu testi sırasında yüksek basınçlı buhar açığa çıkmakta ve bu 120 dBA'ya kadar çıkan ve standartları aşan çok yüksek çıkış gürültüsü üretmektedir [11]. Gürültünün azaltılması ve sınır değerlerin altında

tutulması için sondaja uygun susturucular, jeneratörler ve türbinlere ses kalkanları ve soğutma kulelerine ahşap ve susturucular gibi malzemeler kullanılmaktadır [2], [11].

#### E. Su Kullanımı

Jeotermal enerjinin neden olduğu hidrolojik riskler yeraltı suyu seviyesi ya da miktarıdır. Yeraltı suyu seviyesi üzerindeki etki çoğunlukla jeotermal sistemin türüne bağlı olarak değişmektedir [38]. Sistemler, çekilen su miktarıyla aynı miktarda suyu geri verebilirse yeraltı suyu seviyesi sabit kalır. Bununla birlikte, karmaşık tasarım ve mühendislik bile, dışarı pompalanan miktarın tam olarak aynısını geri getirememektedir [39]. Sıvıların çekilmesi arttıkça rezervuarların basıncı azalmakta, basınç düştükçe yeraltı suyu aşağı doğru akmakta, su seviyeleri düşmekte ve bunun sonucunda kaplıca ve gayzer gibi termal özellikler ortadan kalkmaktadır. Yanal geçirgenliğin düşük ve fayların olduğu bölgelerde su seviyesi düşüşleri daha belirgindir. Ayrıca, kuyu muhafazasındaki arıza, yeraltı suyunun rezervuarların içine hızlı bir şekilde aşağı akışına neden olabilmektedir [40]. Su seviyelerinin ölçülmesi, kuyu muhafazalarının etkili bir şekilde onarılması ve geri kazanım programının bir parçası olarak rezervuar basınçlarının yüksek tutulması bu etkiyi en aza indirmektedir [2].

Yeraltı suyu etkilerini azaltmaya yönelik bir diğer strateji, jeotermal ekstraksiyon süreçlerinin çeşitli aşamalarında su tüketimini en aza indirmektir. Kullanılan büyüklük ve teknolojiye bağlı olarak su tüketim hacmi enerji santrallerine göre değişiklik göstermektedir. Jeotermal santrallerde ihtiyaç duyulan su miktarı, üretilen enerji birimi başına kömür, nükleer ve doğalgaza göre daha düşüktür. Su soğutma kuleleri suyun %50'sinden fazlasını tüketirken, kuru soğutmalı ikili çevrim, kuru soğutucu ve kapalı çevrim nedeniyle fazla suya ihtiyaç duymaz[41]. Ayrıca kuyu açma işlemi de su gerektirir. İnşaat aşamasında matkap ucunun soğutulması, yağlanması ve matkabın kuyu dibinden zemine aktarılması için de suya ihtiyaç duyulmaktadır [42].

#### F. Atıksu

Jeotermal akışkan, potansiyel olarak zararlı olan ve azaltılmadan kullanılması kabul edilemeyen çeşitli elementlerden oluşan bileşikler içerir [2]. Su ve yoğunlaşma suyu genellikle arsenik, civa, kurşun, çinko, bor ve kükürt ile birlikte önemli miktarlarda karbonatlar, silika, sülfatlar ve klorürler gibi

süspansiyon ve çözelti halinde çeşitli toksik kimyasallar taşır [43].

Jeotermal rezervuarın seçilmiş bölümlerine açılan kuyulardan reenjeksiyon atıksuyun en yaygın bertaraf yöntemidir ve ideal olarak bu sıvının tamamının toprağa geri dönmesi gerekir. Reenjeksiyon aynı zamanda rezervuar basıncının korunmasına, kayadan ilave ısı alınmasına ve kaynağın kullanım ömrünün uzatılmasına da yardımcı olabilir [43].

Yeniden enjeksiyon, daha fazla kuyu açmayı, yüzeye boru döşemeyi ve sürekli pompalamayı gerektirdiğinden ilk bakışta oldukça pahalı görünebilir, ancak uzun vadeli etkileri çok faydalıdır. Bir jeotermal projenin tüm ömrü boyunca hesaplandığında, yeniden enjeksiyon normalde hiç yeniden enjeksiyon yapılmamasından daha ucuzdur [44].

Ancak bazı ekonomik ve teknik nedenlerden dolayı bu döngü çalışmaz ve atıksu yeryüzüne deşarj edilir. Ayrıca işletme sırasında jeotermal santralin faaliyeti sonucu bazı gazlar açığa çıkmakta, bu gazlar yağışla toprağı ve yüzey sularını kirletmektedir [45]. Sıvı transfer ekipmanının ve kuyu muhafazasının hasar görmesi de yüzey suyunun kirlenmesine yol açmaktadır [2].

#### G. Katı Atıklar

Jeotermal santrallerde üretilen katı atık miktarı düşüktür ve önemli bir çevresel sorun değildir. Bu tesislerdeki katı atıklar esas olarak sondaj çamuru ve matkapla kesmeyi gerektiren sondaj sırasında üretilmektedir.

Jeotermal alanlardan gelen sıvı genellikle karbonat/sülfat tuzları, silika ve silikat tuzları dahil olmak üzere toprak/formasyon bileşenleriyle doyurulmuş olmakta; bunlar sıcaklık düşüşüyle birlikte çökelmekte ve uygun atık yönetimi gerektiren katı atık olarak birikmektedir [4].

Diğer atıklar arasında ambalaj atıkları, ahşap, metal, kauçuk atıkları, makine ve ekipmanların bakım ve onarımından kaynaklanan filtreler, yağlama maddeleri ile kentsel atıklar yer almaktadır [2]. Jeotermal enerji santrallerinde oluşan atıklar Atıkların Yönetimi Yönetmeliği ve ilgili diğer yönetmeliklere göre ayrı ayrı depolanmalı ve lisanslı bertaraf ya da geri dönüşüm tesislerine verilmelidir.

#### H. Termal Kirlilik (Atık ısı)

Atıksu ile çevreye veya havaya salınan atık ısı ilişkilidir. En yüksek atık ısı seviyesi ikili

çevrimlere aitken en düşük atık ısı doğrudan buhar çevrimlerine aittir. Atmosfere atılan ısı alan ısıtma, sera ve toprak ısıtma, ısı pompası uygulamaları ve balık yetiştiriciliği gibi hibrit uygulamalarda kullanılarak azaltılabilir [47].

#### i. Biyolojik Çeşitlilik, Flora ve Fauna

Jeotermal enerji kaynaklarının korunan alanlarda bulunması, yaban hayatı, sucul biyota, bitki örtüsü ve bunların yaşam alanlarını içeren ekolojik hayat üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Kuyu işletmeciliği, soğutma kuleleri, inşaat, taşıt gibi santral faaliyetleri yaban hayatını rahatsız etmekte, ayrıca toprak ve su kalitesinin bozulması bitki örtüsüne ve su ekosistemlere zarar vermektedir.

Tesislerin yalıtımı, enerji santralının etrafının çitle çevrilmesi, susturucuların kullanılması, bitkilendirme ve termal özellikleri kurtarmak için rezervuarların geri kazanılması çevresel etkinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır [46].

#### IV. SONUÇLAR

Fosil kaynakların her geçen gün biraz daha tükenmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Artan nüfusun ve gelişen ekonominin enerji gereksinimlerinin kesintisiz, sürekli ve olabilen en az maliyetle karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde etme çalışmaları hız kazanmış ve enerji üretimi artmıştır.

Jeotermal enerji temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır ancak gelişiminin çevre üzerinde bir miktar da olsa etkisi vardır. Jeotermal gelişimin ana çevresel etkileri yüzey bozuklukları, sıvı çekilmesinin fiziksel etkileri, ısı etkileri ve kimyasalların deşarjı ile ilgilidir. Tüm bu faktörler biyolojik çevreyi de etkilemektedir. Bu çevresel etkinin olumlu ve olumsuz yönleri, bir jeotermal alanın geliştirilmesine yönelik herhangi bir kararın yanı sıra olası hafifletme önlemlerinden önce değerlendirilmeli ve dikkate alınmalıdır.

#### KAYNAKLAR

- [1] A. G., Olabi and Abdelkareem, M. A. "Renewable energy and climate change." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, 112111, 2022.
- [2] M., Soltani, F. M., Kashkooli, M., Sourı, B., Rafiei, M., Jabarifar, K., Gharali, and J. S. Nathwani, "Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, 110750, 2021.
- [3] D. Liu, X. Guo and B. Xiao, "What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40

- countries Science of the Total Environment*, vol. 661, pp. 750-766, 2019.
- [4] E. T. Sayed, T. Wilberforce, K. Elsaid, M. K. H. Rabaia, M. A. Abdelkareem, K. J. Chae and A. G. Olabi, "A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal." *Science of The Total Environment*, vol. 766, 144505, 2021.
- [5] A. Hussain, S. M. Arif and M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 12-28, 2017.
- [6] E. Madi, K. Pope, W. Huang and T. Iqbal, "A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 269-281, 2019.
- [7] J. Mohtasham, "Renewable energies." *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1289-1297, 2015.
- [8] N. Long, and K. Steinberger, Renewable energy is key to fighting climate change. Natural Resources Defense Council. (2016).
- [9] R. Adib, H. E. Murdock, F. Appavou, A. Brown, B. Epp, A. Leidreiter,...and T. C. Farrell, "Renewables 2015 global status report." *REN21 Secretariat*, Paris, France, vol. 162, 2015.
- [10] H. K. Gupta and S. Roy, "Geothermal energy: An alternative resource for the 21st century." *Elsevier*. 2006.
- [11] H. Kristmannsdóttir and H. Ármannsson, "Environmental aspects of geothermal energy utilization." *Geothermics*, vol. 32(4-6), pp. 451-461, 2003.
- [12] O. Hanbury and V. R. Vasquez, "Life cycle analysis of geothermal energy for power and transportation: A stochastic approach." *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 371-381, 2018.
- [13] D. Moya, J. Paredes and P. Kaparaju, "Technical, financial, economic and environmental pre-feasibility study of geothermal power plants by RETScreen-Ecuador's case study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 628-637, 2018.
- [14] R. Shortall, B. Davidsdottir and G. Axelsson, "Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 391-406, 2015.
- [15] P. Bayer, L. Rybach, P. Blum and R. Brauchler, "Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 446-463, 2013.
- [16] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Jeotermal Kaynaklı Enerji Santralleri." Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Çevre Envanteri ve Bilgi Yönetimi Dairesi Başkanlığı, 2013
- [17] R. DiPippo and J. L. Renner, "Geothermal energy." *In Future Energy*, Elsevier. pp. 471-492, 2014.
- [18] E. Barbier, "Geothermal energy technology and current status: an overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6(1-2), pp. 3-65, 2002.

- [19] Y. Noorollahi, M. S. Shabbir, A. F. Siddiqi, L. K. Ilyashenko and E. Ahmadi, "Review of two decade geothermal energy development in Iran, benefits, challenges, and future policy." *Geothermics*, vol. 77, pp. 257-266, 2019.
- [20] J. W. Lund, D. H. Freeston and T. L. Boyd, "Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review." *Geothermics*, vol. 40(3), pp. 159-180, 2011.
- [21] A. Aslan, "Jeotermal Enerjiş Santralleri." [https://www.insaport.com/makale/jeotermal-enerji/#Jeotermal\\_Enerji\\_Santralleri](https://www.insaport.com/makale/jeotermal-enerji/#Jeotermal_Enerji_Santralleri). (2021). Erişim Tarihi: 20.12.2023.
- [22] A. Manzella, R. Bonciani, A. Allansdottir, S. Botteghi, A. Donato, S. Giamberini, A. Lenzi, M. Paci, A. Pellizzone and D. Scrocca, D. "Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy." *Geothermics*, 72, 232-248, 2018.
- [23] R. Bertani, "IGA activities, highlights of the 28th IGA Board Meeting. IGA Quarterly, 44, 1-2. 2001.
- [24] R. DiPippo, "Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact." Butterworth-Heinemann. 2012.
- [25] H. H. Quy, T. T. Van and N. D. Minh, "Potential of Vietnam's Geothermal Energy and Recommendations on its Research and Development." *Transactions-Geothermal Resources Council*, pp. 397-398, 2000.
- [26] J. A. Griffith, C. C. Trettin, and R. V. O'Neill, "A landscape ecology approach to assessing development impacts in the tropics: A geothermal energy example in Hawaii." *Singapore Journal of Tropical Geography*, vol. 23(1), pp.1-22, 2002.
- [27] P. Jeanne, J. Rutqvist, A. P. Rinaldi, P. F. Dobson, M. Walters, C. Hartline and J. Garcia, "Seismic and aseismic deformations and impact on reservoir permeability: The case of EGS stimulation at The Geysers, California, USA." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 120(11), pp. 7863-7882, 2015.
- [28] T. M. Hunt, "Five lectures on environmental effects of geothermal utilization." 2001.
- [29] M. Keiding, T. Árnadóttir, S. Jónsson, J. Decriem and A. Hooper, "Plate boundary deformation and man-made subsidence around geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, Iceland." *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 194(4), pp. 139-149, 2010.
- [30] P. Jeanne, J. Rutqvist, P. F. Dobson, M. Walters, C. Hartline and J. Garcia, "The impacts of mechanical stress transfers caused by hydromechanical and thermal processes on fault stability during hydraulic stimulation in a deep geothermal reservoir." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 72, pp. 149-163, 2014.
- [31] Q. Gan, and D. Elsworth, "Thermal drawdown and late-stage seismic-slip fault reactivation in enhanced geothermal reservoirs." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 119(12), pp. 8936-8949, 2014.
- [32] T. D. Rathnaweera, W. Wu, Y. Ji and R. P. Gamage, "Understanding injection-induced seismicity in enhanced geothermal systems: From the coupled thermo-hydro-mechanical-chemical process to anthropogenic earthquake prediction." *Earth-science Reviews*, vol. 205, 103182, 2020.
- [33] A. R. Kazemi, S. B. Mahbaz, A. R. Dehghani-Sanij, M. B. Dusseault, R. Fraser, "Performance evaluation of an enhanced geothermal system in the Western Canada Sedimentary Basin." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, 109278, 2019.
- [34] D. M. Cruden and D. J. Varnes, "Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes." *Transportation Research Board Special Report*, vol. 247, 1996.
- [35] R. DiPippo, "Environmental impact of geothermal power plants." *Geothermal Power Plants*, vol. 684, 2016.
- [36] R. DiPippo, "Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact." Butterworth-Heinemann, 2012.
- [37] M. Bonte, P. J. Stuyfzand, A. Hulsmann and P. Van Beelen, "Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union." *Ecology and Society*, vol. 16(1), 2011.
- [38] C. D. Orio, A. Chiasson, C. N. Johnson, Z. Deng, S. J. Rees and J. D. Spittler, "A Survey of Standing Column Well Installations in North America." *ASHRAE Transactions*, vol. 111(2), 2005.
- [39] T.M. Hunt, "Geothermal Resources, Environmental Aspects of. In: Meyers," R. (eds) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6\\_838-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_838-3), 2017.
- [40] C. E. Clark and C. B. Harto, J. L. Sullivan and M. Q. Wang, "Water use in the development and operation of geothermal power plants" (No. ANL/EVS/R-10/5). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). 2010.
- [41] C. E. Clark, C. B., Harto and W. A. Troppe, "Water resource assessment of geothermal resources and water use in geopressured geothermal systems" (No. ANL/EVS/R-11/10 REV. 1). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). (2013).
- [42] S. Chen, Q. Zhang, P. Andrews-Speed and B. Mclellan, "Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: A review." *Journal of Environmental Management*, vol. 276, 111287, 2020.
- [43] I. B. Fridleifsson and D. H. Freeston, "Geothermal energy research and development." *Geothermics*, vol. 23(2), pp. 175-214, 1994.
- [44] M. Soltani, F. Moradi Kashkooli, A. R. Dehghani-Sanij, A. Nokhosteen, A. Ahmadi-Joughi, K. Gharali, S.B. Mahbaz and M. B. Dusseault, "A comprehensive review of geothermal energy evolution and development." *International Journal of Green Energy*, vol. 16(13), pp. 971-1009, 2019.
- [45] A. C. De Jesus, "Environmental benefits and challenges associated with geothermal power generation. In *Geothermal Power Generation*," Woodhead Publishing pp. 477-498. 2016.
- [46] L. Rybach and T. Kohl, "Waste heat problems and solutions in geothermal energy." *Geological Society*,

London, Special Publications, vol. 236(1), pp. 369-380,  
2004.