

Küresel Jeotermal Enerji Kullanımı

Kapasite Analizi ve Kanserojenik Maddelerin Çevresel Durumu

Akademik İnceleme Raporu

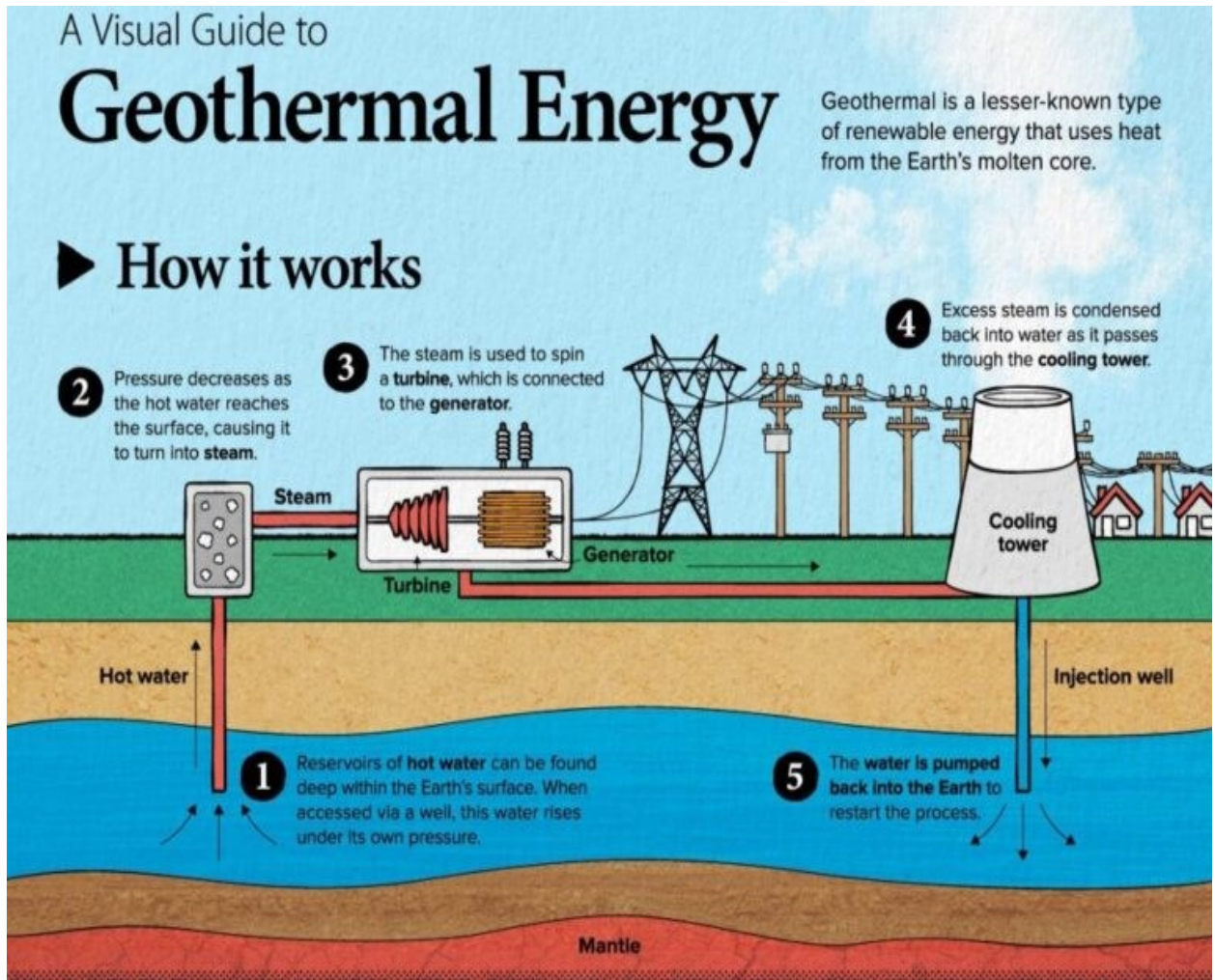
Bu rapor, YZ programıyla yazışmalarla düzeltilerek hazırlanmıştır.
Bu konudaki uzmanların görüş ve düzeltmelerine açıktır.

Hazırlayan: Yüksel Atakan 13.02.2026

Yönetici Özeti

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu akademik rapor, 2024-2025 dönemi itibarıyla dünya genelinde jeotermal enerjinin elektrik üretimi ve doğrudan ısı uygulamalarında kullanımını incelemekte, 20 önde gelen ülkenin kurulu kapasitesi ve enerji üretimini analiz etmektedir. Çalışma ayrıca jeotermal sıvılarda bulunan kanserojenik ve toksik maddelerin yönetimi ile ilgili kritik zorlukları ele almakta, özellikle arsenik, bor, cıva ve diğer tehlikeli bileşiklere odaklanmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve ThinkGeoEnergy gibi uluslararası kuruluşlardan derlenen verilere dayanmaktadır.



Küresel Jeotermal Kapasite - Ana Bulgular

2024 yılı sonu itibarıyla küresel jeotermal elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 16,9-17,2 GW seviyesine ulaşmış olup, 35 ülkede jeotermal santral işletilmektedir. Küresel

jeotermal filonun yıllık elektrik üretimi tahmini 99 TWh düzeyindedir ve bu miktar dünya elektrik üretiminin yaklaşık %0,34'üne karşılık gelmektedir.

En büyük 10 ülke, küresel kurulu jeotermal kapasitesinin yaklaşık %93'ünü oluşturmaktadır:

- ABD: 3.953 MW (dünya lideri) - Kaliforniya ve Nevada eyaletlerinde yoğunlaşmış
- Endonezya: 2.742 MW - Pasifik Ateş Çemberi üzerinde stratejik konum
- Filipinler: 2.034 MW - Toplam elektrik üretiminin %10'u jeotermalden
- Türkiye: 1.797 MW - Hızlı büyüme gösteren pazar
- Yeni Zelanda: 1.259 MW - Toplam elektriğin %18'i jeotermalden
- Kenya: 980 MW - Ulusal elektriğin %45'i jeotermalden (en yüksek oran)

Jeotermal enerji sektörü ortalama %67,5 kapasite faktörü ile çalışmakta olup, bu oran güneş fotovoltaik (%15) ve rüzgar enerjisinden (%30) önemli ölçüde yüksektir. Bu yüksek kapasite faktörü, jeotermal kaynakların sürekli ve sevk edilebilir yapısını yansıtmakta ve şebeke kararlılığı ile temel yük gücü sağlanması açısından özellikle değerli kılmaktadır.



Doğrudan Isı Enerjisi Kullanımı

Elektrik üretiminin ötesinde, jeotermal enerji bölgesel ısıtma, endüstriyel süreçler, sera tarımı, su ürünleri yetiştiriciliği ve rekreasyonel amaçlar için yaygın şekilde

kullanılmaktadır. 21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı (REN21) verilerine göre, jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı 2024'te yaklaşık %20 artarak tahmini 245 TWh (882 petajoule) seviyesine ulaşmıştır.

Doğrudan jeotermal ısı kullanımında önde gelen ülkeler Çin, Türkiye, İzlanda ve Japonya'dır. Çin özellikle hızlı büyüme göstermiş, jeotermal bölgesel ısıtma kapasitesi 2015-2019 döneminde yıllık %21'i aşan bileşik büyüme oranı kaydetmiştir.

Kanserojenik Maddeler ve Çevresel Riskler

Derin rezervuarlardan çıkarılan jeotermal sıvılar, yüksek sıcaklık ve basınçlarda uzun süreli su-kayaç etkileşimleri sonucu oluşan karmaşık kimyasal bileşimler sergilemektedir. Bu sıvılar, arıtılmadan çevreye salınırsa ciddi çevre ve sağlık riskleri oluşturabilecek yüksek konsantrasyonlarda çözünmüş mineraller, gazlar ve iz elementler içermektedir.

Kayıp verici başlıca kirleticiler şunlardır:

- Arsenik: Bazı jeotermal sahalarda 4-10 mg/L konsantrasyonlara ulaşabilmekte, DSÖ içme suyu standardı olan 10 µg/L'nin çok üzerindedir. Arseniğin kanserojenik etkileri iyi belgelenmiştir.
- Bor: Tarımsal su kalitesi standartlarını aşan seviyelerde bulunabilmekte ve bitki gelişimi için toksik olabilmektedir.
- Cıva ve ağır metaller: Kurşun, kadmiyum ve krom dahil olmak üzere, düşük konsantrasyonlarda bile biyolojik sistemlerde birikebilmektedir.
- Hidrojen sülfür gazı: Toksik ve korozyif özelliklere sahiptir.
- Silika: Boru ve ekipmanlarda kireçlenme sorunlarına neden olmaktadır.

Türkiye'nin Balçova jeotermal sahasında yapılan çalışmalar (Aksoy ve ark., 2009), arsenik, antimon ve bor konsantrasyonlarının son derece yüksek olduğunu ve insan sağlığı ile tarımsal verimlilik açısından risk oluşturduğunu belirlemiştir. Benzer bulgular Yeni Zelanda, Filipinler ve dünya genelindeki volkanik bölgelerdeki jeotermal sahalarda da rapor edilmiştir.

Arıtma Teknolojileri - Temel Yaklaşımlar

Jeotermal sıvıların kapsamlı arıtımı, düzenleyici uyumu sağlamak ve faydalı yeniden kullanımı mümkün kılmak için sıklıkla birden fazla teknolojinin seri olarak entegrasyonunu gerektirmektedir. Başlıca arıtma teknolojileri ve etkinlikleri şunlardır:

1. Elektrokoagülasyon (EC):

Arsenik, silika ve diğer kirleticilerin giderilmesi için maliyet etkin bir teknoloji. Demir elektrotlar arsenik konsantrasyonlarını 4 mg/L'den 0,1 mg/L'nin altına düşürebilmekte (%95+ giderim), alüminyum elektrotlar ise silika konsantrasyonlarını 600 mg/L'den 100 mg/L'nin altına indirebilmektedir (%83+ giderim). Düşük kimyasal kullanımı, basit işletme ve ayrılabilir atık akımları avantajları sunmaktadır.

2. Membran Filtrasyon Teknolojileri:

Ters ozmoz (RO), nanofiltrasyon (NF) ve ultrafiltrasyon (UF) etkili ayırım yöntemleri sunmaktadır. RO arsenat (As(V)) için %98-99 giderim sağlarken, arsenit (As(III)) giderimi %46-75 düzeyindedir. Bor giderimi %85-95 arasındadır. Yüksek giderim oranları, çoklu kirlenici giderimi ve kimyasal ilave gerektirmeme avantajları vardır, ancak yüksek yatırım maliyeti ve enerji tüketimi dezavantajları bulunmaktadır.

3. Adsorpsiyon ve İyon Değişimi:

Demir bazlı adsorbentler arsenik giderimi için oldukça etkilidir. Sıfır değerlikli demir (Fe^0) %60-90 arsenik giderimi sağlayabilmektedir. Şelat reçineleri ile seçici arsenik ve bor giderimi mümkündür (arsenik için %70-95, bor için %80-95). Seçici giderim, rejenerasyon kabiliyeti ve esneklik avantajları sunmaktadır.

4. Kimyasal Çöktürme ve Oksidasyon:

Ferrik klorür veya ferrik sülfat ilavesiyle arsenik çöktürmesi %85-95 giderim sağlamaktadır. Ağır metaller için %90-99 giderim elde edilebilmektedir. Kanıtlanmış teknoloji, yüksek konsantrasyonlar için etkililik ve düşük yatırım maliyeti avantajları bulunmaktadır.

Ekonomik Değerlendirme

Kapsamlı jeotermal su arıtma tesisleri için toplam proje maliyetleri, ham su kalitesi, arıtma hedefleri ve tesis kapasitesine bağlı olarak yaklaşık 10-78 milyon ABD doları yatırım harcaması ve arıtılmış su metreküpü başına 0,15-2,73 ABD doları işletme maliyeti arasında değişmektedir. Bu maliyetler, arıtılmış suyun faydalı yeniden kullanımının değeri ve çevre koruma için yasal gereklilikler ile dengelenmelidir.

Gelecek Perspektifleri

Uluslararası Enerji Ajansı, teknolojik ilerleme ve maliyet azaltımının devam etmesi durumunda, jeotermal enerjinin 2050 yılına kadar küresel elektrik talebi artışının %15'ini karşılayabileceğini öngörmektedir. Bu, yaklaşık 800 GW kapasite kurulumu ve yıllık 6.000 TWh üretim anlamına gelmektedir. Bu potansiyelin gerçekleşmesi, konvansiyonel hidrotermal sistemlerin ötesindeki derinliklerde ısı kaynaklarına erişebilecek Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (EGS) ve kapalı döngü teknolojilerinin ilerlemesine kritik şekilde bağlıdır.

8 km derinliğe kadar EGS'nin tam teknik potansiyeli, dünya genelinde yaklaşık 600 TW kapasite olarak tahmin edilmektedir; bu miktar dünya elektrik talebini 140 kez karşılamaya yeterlidir. Ancak ticari yaygınlaştırma, sondaj inovasyonu, rezervuar mühendisliği ilerlemeleri ve ölçek ekonomileri yoluyla önemli maliyet azaltımı gerektirmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Jeotermal enerji, yüksek kapasite faktörleri ile temel yük gücü sağlayan ve çok sayıda ülkede enerji güvenliğine önemli katkıda bulunan küresel yenilenebilir enerji portföyünün kritik bir bileşenidir. Kanserojenik ve toksik maddelerin yönetimi, uygun arıtma teknolojileri ile ele alınması gereken çevresel ve halk sağlığı zorlukları oluşturmaktadır.

En önemli kanserojenik kirletici olan arsenik, elektrokoagülasyon, membran filtrasyon, demir bazlı adsorpsiyon, kimyasal çöktürme ve iyon değişimi prosesleri yoluyla etkili şekilde giderilebilmektedir. Birden fazla teknolojiyi entegre eden kapsamlı arıtma yaklaşımları, düzenleyici uyumu sağlayabilmekte ve jeotermal suların faydalı yeniden kullanımını mümkün kılabilir.

Hem kaynak geliştirme hem de çevresel yönetim için jeotermal teknolojilerdeki sürekli ilerleme, dünya genelinde jeotermal enerjinin önemli kullanılmayan potansiyelinin gerçekleştirilmesi için gerekli olacaktır.

Öz

Bu akademik rapor, 2024-2025 dönemi itibarıyla elektrik üretimi ve doğrudan ısı enerjisi uygulamaları için jeotermal enerjinin küresel kullanımını incelemekte, 20 önde gelen ülkedeki kurulu kapasite ve enerji üretimini analiz etmektedir. Çalışma ayrıca jeotermal sınırlarda bulunan kanserojenik ve toksik maddelerin yönetilmesinin kritik zorluğunu araştırmakta, özellikle arsenik, bor, cıva ve diğer tehlikeli bileşiklere odaklanmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve ThinkGeoEnergy dahil uluslararası kuruluşlardan elde edilen verilere dayanarak, bu rapor 2024 yılı sonu itibarıyla küresel jeotermal güç kapasitesinin yaklaşık 16,9-17,2 GW'a ulaştığını ve yıllık tahmini 99 TWh üretim gerçekleştirdiğini belgelemektedir. Çevresel yönetim bölümü, elektrokoagülasyon, membran filtrasyon, adsorpsiyon, iyon değişimi ve kimyasal çöktürme yöntemleri dahil olmak üzere kanserojenik maddelerin giderilmesi için yerleşik ve gelişmekte olan arıtma teknolojilerini gözden geçirmektedir. Bulgular, jeotermal enerjinin küresel elektrik üretiminin sadece %0,34'ünü temsil etmesine rağmen, Kenya, İzlanda, El Salvador ve Yeni Zelanda gibi ülkelerde enerji güvenliği açısından kritik temel yük gücü sağladığını göstermektedir.

1. Giriş

Jeotermal enerji, elektrik üretimi ve doğrudan termal uygulamalar için Dünya'nın iç kısımlarından elde edilen ısıyı kullanan sürdürülebilir ve güvenilir bir yenilenebilir enerji kaynağını temsil etmektedir. Güneş ve rüzgar gibi kesintili yenilenebilir kaynaklardan farklı olarak, jeotermal santraller genellikle %75'i aşan yüksek kapasite faktörlerinde sürekli olarak çalışabilmekte ve elektrik şebekelerine gerekli temel yük gücü sağlamaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı'na göre (IEA, 2024), jeotermal enerji şu anda küresel enerji talebinin %1'inden azını karşılamakta olup, kullanımı erişilebilir yüksek kaliteli hidrotermal kaynaklara sahip ülkelerde yoğunlaşmaktadır. Ancak, Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (EGS) ve kapalı döngü sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, jeotermal

gelişimin potansiyel coğrafi erişimini geleneksel volkanik ve tektonik olarak aktif bölgelerin ötesine genişletmektedir.

Jeotermal enerji gelişimindeki önemli bir zorluk, arsenik, bor, cıva, ağır metaller ve çözünmüş tuzlar dahil olmak üzere yüksek konsantrasyonlarda potansiyel olarak tehlikeli maddeler içeren jeotermal sıvıların yönetimidir (Baba ve ark., 2021). Bu bileşenler, arıtma ve bertaraf sistemleri aracılığıyla uygun şekilde yönetilmezlerse çevresel ve halk sağlığı riskleri oluşturmaktadır. Bu rapor hem mevcut küresel jeotermal kullanımı hem de bu çevresel endişeleri azaltmak için kullanılan teknolojileri incelemektedir.

2. Küresel Jeotermal Enerji Kapasitesi ve Üretimi

2.1 Küresel Kapasite Genel Görünümü

ThinkGeoEnergy (2025) ve IRENA (2024) tarafından belgelenen verilere göre, küresel jeotermal güç üretim kapasitesi 2024 yılı sonunda 16.873 MW'a ulaşmış olup, 35 ülkede jeotermal santral işletilmektedir. 2024 yılı boyunca yaklaşık 400 MW yeni kapasite devreye alınmış ve bu miktar 2019'dan bu yana en büyük yıllık artışı temsil etmektedir. Küresel jeotermal filo 2024'te tahmini 99 TWh elektrik üretmiş olup, bu miktar dünya çapında elektrik üretiminin yaklaşık %0,34'ünü temsil etmektedir.

Jeotermal güç sektörü ortalama %67,5 kapasite faktörü ile çalışmakta olup, bu oran güneş fotovoltaik (yaklaşık %15) ve rüzgar enerjisinden (yaklaşık %30) önemli ölçüde yüksektir. Bu yüksek kapasite faktörü, jeotermal kaynakların sürekli ve sevk edilebilir yapısını yansıtmakta ve şebeke kararlılığı ile temel yük gücü sağlanması açısından özellikle değerli kılmaktadır.

2.2 Önde Gelen Jeotermal Ülkeler

Tablo 1, 2024-2025 yılı sonu itibarıyla en büyük 20 jeotermal enerji üreten ülkenin kurulu kapasitesini ve tahmini yıllık elektrik üretimini sunmaktadır. Veriler ThinkGeoEnergy (2025), IRENA (2024) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı tarafından sağlanan verilerden derlenmiştir.

Tablo 1: İlk 20 Jeotermal Enerji Üreten Ülke (2024-2025)

Sıra	Ülke	Kurulu Kapasite (MW)	Tahmini Yıllık Üretim (GWh/yıl)
1	ABD	3.953	19.142
2	Endonezya	2.742	16.677
3	Filipinler	2.034	10.425
4	Türkiye	1.797	11.119
5	Yeni Zelanda	1.259	8.544

6	Kenya	980	5.325
7	Meksika	976	4.536
8	İtalya	916	5.837
9	İzlanda	786	5.916
10	Japonya	607	4.200
11	El Salvador	204	1.587
12	Nikaragua	155	750
13	Kosta Rika	262	1.350
14	Rusya	82	450
15	Papua Yeni Gine	56	350
16	Guatemala	52	280
17	Portekiz (Azorlar)	29	180
18	Çin	28	150
19	Almanya	47	240
20	Fransa	16	90

Kaynaklar: ThinkGeoEnergy (2025), IRENA (2024), Springer Nature Communities (2024)

2.3 Bölgesel Dağılım ve Enerji Önemi

İlk 10 ülke, küresel kurulu jeotermal kapasitesinin yaklaşık %93'ünü oluşturmakta ve bu durum jeotermal gelişimin yoğunlaşmış yapısını göstermektedir. ABD, öncelikle Kaliforniya ve Nevada'da yoğunlaşmış 3.953 MW ile liderlik etmektedir; bu eyaletlerde jeotermal, eyalet elektrik üretiminin yaklaşık %10'unu sağlamaktadır. Pasifik Ateş Çemberi üzerinde yer alan Endonezya ve Filipinler, 2.742 MW ile dünya çapında ikinci sırada yer alan Endonezya ile önemli jeotermal kaynaklara sahiptir.

Jeotermal küresel elektrik üretiminin küçük bir bölümünü temsil etmesine rağmen, birçok ulusal enerji sisteminde kritik bir rol oynamaktadır. Bertani ve ark. (2024) tarafından derlenen verilere göre, jeotermal elektrik yedi ülkede toplam üretimin %10'undan fazlasını temsil etmektedir: Kenya (%45), İzlanda (%33), El Salvador (%24), Yeni Zelanda (%18), Nikaragua (%15), Kosta Rika (%12) ve Filipinler (%10). Bu ülkelerde jeotermal, temel yük gücü sağlamakta ve enerji bağımsızlığı ile karbonsuzlaştırma hedeflerine önemli katkıda bulunmaktadır.

3. Jeotermal Isının Doğrudan Kullanımı

Elektrik üretiminin ötesinde, jeotermal enerji bölgesel ısıtma, endüstriyel süreçler, sera tarımı, su ürünleri yetiştiriciliği ve rekreasyonel banyo dahil olmak üzere doğrudan termal uygulamalar için yaygın şekilde kullanılmaktadır. 21. Yüzyıl için Yenilenebilir

Enerji Politikası Ağı'na göre (REN21, 2025), jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı 2024'te yaklaşık %20 artarak tahmini 245 TWh (882 petajul) seviyesine ulaşmıştır.

2024'te doğrudan jeotermal ısı kullanımında önde gelen ülkeler Çin, Türkiye, İzlanda ve Japonya olmuştur. Çin özellikle hızlı büyüme yaşamış ve jeotermal bölgesel ısıtma kapasitesi 2015-2019 döneminde %21'i aşan bileşik yıllık büyüme oranı kaydetmiştir. 2024-2025 ısıtma sezonunda, Çin'in jeotermal ısıtması, jeotermal kaynakların yoğun nüfus merkezleriyle örtüştüğü doğu Çin'deki kentsel alanlarda öncelikli olarak konut ve ticari ısıtma için ek 120 milyon metrekare bina alanına hizmet vermiştir.

İzlanda, dünya genelinde kişi başına jeotermal kaynak kullanımında en yüksek seviyeyi temsil etmekte ve geniş bölgesel ısıtma ağıları aracılığıyla alan ısıtması talebinin %90'ından fazlasını jeotermal enerji ile karşılamaktadır. Yeni Zelanda, Macaristan, Rusya, İtalya, ABD ve Brezilya da özellikle sera tarımı, endüstriyel ısıtma ve balneoterapi amaçları için önemli doğrudan kullanım uygulamalarını sürdürmektedir.

4. Jeotermal Sıvılarda Kanserojenik ve Toksik Maddeler

4.1 Jeotermal Suların Kimyasal Bileşimi

Derin rezervuarlardan çıkarılan jeotermal sıvılar, yüksek sıcaklık ve basınçlarda uzun süreli su-kayaç etkileşimlerinden kaynaklanan karmaşık kimyasal bileşimler sergilemektedir. Baba ve ark. (2021, 2022) ve Aksoy ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmalarda belgelendiği gibi, jeotermal sular genellikle arıtılmadan salınırsa çevresel ve sağlık riskleri oluşturabilecek yüksek konsantrasyonlarda çözünmüş mineraller, gazlar ve iz elementler içermektedir.

Endişe verici yaygın bileşenler arasında bazı jeotermal sahalarda 4-10 mg/L konsantrasyonlara ulaşabilen arsenik; tarımsal su kalitesi standartlarını aşan seviyelerde bulunan bor; kurşun, kadmiyum ve krom dahil cıva ve diğer ağır metaller; hidrojen sülfür gazı; kireçlenme sorunlarına neden olan silika; ve içme suyu standartlarını önemli ölçüde aşan konsantrasyonlarda toplam çözünmüş katılar bulunmaktadır.

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), iyi belgelenmiş kanserojenik etkileri nedeniyle içme suyunda arsenik için maksimum kirletici seviyesini 10 µg/L olarak belirlemiştir. Medrano ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmalar, kronik arsenik maruziyeti ile kardiyovasküler mortalite arasındaki ilişkileri göstermiş, Taiwan'ın kara ayak hastalığı endemik bölgelerindeki araştırmalar ise mesane, akciğer ve karaciğer kanserleriyle bağlantıları doğrulamıştır. Benzer şekilde, kurşun, kadmiyum ve cıva gibi toksik metaller biyolojik sistemlerde birikerek nispeten düşük konsantrasyonlarda bile nörolojik hasar, üreme bozuklukları, böbrek hastalığı ve kansere neden olabilmektedir.

4.2 Çevresel ve Sağlık Riskleri

Birkle ve Merkel (2000) ve sonraki çalışmalar tarafından yapılan araştırmalar, jeotermal deşarjın yetersiz yönetiminin yüzey suları, yeraltı suyu akiferlerinin ve tarım arazilerinin kontaminasyonuna neden olduğu vakaları belgelemiştir. Demir Yetiş ve Özgüven (2020)

tarafından Türkiye'nin Harran Ovası'nda yapılan çalışma, jeotermal faaliyetlere bitişik yeraltı suyu sistemlerinde alüminyum, bor, florür, demir ve molibden kontaminasyonunu belirlemiş ve konsantrasyonların içme suyu standartlarını aştığını tespit etmiştir.

Türkiye'nin Balçova jeotermal sahasında, Aksoy ve ark. (2009) arsenik, antimon ve bor konsantrasyonlarının son derece yüksek olduğunu ve insan sağlığı ile tarımsal verimlilik açısından risk oluşturduğunu belirlemiştir. Arsenik, kanserojenik potansiyeli nedeniyle en tehlikeli kirletici olarak tanımlanmışken, borun tarımsal sistemler için özellikle zararlı olduğu bulunmuştur. Benzer bulgular Yeni Zelanda, Filipinler ve dünya çapındaki volkanik bölgelerdeki jeotermal sahalarda da rapor edilmiştir.

Bu maddelerin kanserojenik ve mutajenik özellikleri, jeotermal sıvıların yüzey sularına deşarj edilmeden, yeraltı formasyonlarına yeniden enjekte edilmeden veya tarım ya da su ürünleri yetiştiriciliği gibi kademeli uygulamalarda kullanılmadan önce titiz arıtma protokollerini zorunlu kılmaktadır. Uygun arıtma olmadan, jeotermal gelişim kabul edilemez çevresel bozulma ve halk sağlığı sonuçlarına yol açabilmektedir.

5. Kanserijenik Maddelerin Giderilmesi için Teknolojiler

5.1 Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon (EC), jeotermal sıvılardan arsenik, silika ve diğer kirleticilerin giderilmesi için gelişmekte olan ve maliyet etkin bir teknolojiyi temsil etmektedir. Yeni Zelanda ve uluslararası alanda yapılan araştırmalarla gösterildiği gibi, EC tipik olarak demir veya alüminyum olan feda elektrotların elektrolitik oksidasyonu yoluyla in-situ koagülantlar üretmek için doğru akım kullanmaktadır.

Laboratuvar ve saha çalışmaları, demir elektrotların arsenik konsantrasyonlarını yaklaşık 4 mg/L'den 0,1 mg/L'nin altına düşürerek içme suyu standartlarını karşılayabildiğini göstermiştir. Alüminyum elektrotlar silika giderimi için en etkili olduğu kanıtlanmış ve konsantrasyonları 600 mg/L'den 100 mg/L'nin altına düşürmüştür. Süreç, iki bileşen olarak ayrılabilen kolayca çökelen floklar üretmektedir: çöp sahasına bertarafı uygun arsen içermeyen silika çamuru ve özel arıtma veya yeniden enjeksiyon gerektiren daha küçük bir arsenik/demir fraksiyonu.

Elektrokoagülasyonun avantajları arasında basit işletme, minimum kimyasal ilavesi, kısa arıtma süresi ve konvansiyonel koagülasyon-flokülasyon proseslerine kıyasla daha düşük çamur üretimi bulunmaktadır. Teknoloji, yeniden kullanım veya deşarjdan önce yaşlanmış jeotermal su ve buhar yoğunlaşmasının arıtımı için başarıyla gösterilmiştir.

5.2 Membran Filtrasyon Teknolojileri

Ters ozmoz (RO), nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF) ve elektrodializ dahil membran bazlı ayırma teknolojileri, jeotermal sulardan çözünmüş katıların, arseniğin, borun ve diğer kirleticilerin giderilmesi için etkili yöntemler sunmaktadır. Clifford ve ark. tarafından yapılan araştırma, ters ozmozun arsenat (As(V)) için %98-99 giderim sağlayabildiğini, ancak arsenit (As(III)) gideriminin tipik pH aralıklarında nötr yükü nedeniyle %46-75 ile daha düşük olduğunu göstermiştir.

Tuzlu jeotermal suyun arıtımı üzerine yapılan çalışmalar, N-metil-D-glukamin fonksiyonelleştirilmiş şelat reçineleri ile içi boş fiber ultrafiltrasyon membranlarını birleştiren hibrid adsorpsiyon-membran filtrasyon sistemlerini kullanmıştır. Bu sistemler bor ve arseniği eş zamanlı olarak giderebilmekte ve performans adsorbent konsantrasyonuna ve reçine değiştirme oranına bağlıdır.

Membran prosesleri yoluyla optimum arsenik giderimi için, arsenitin arsenata ön oksidasyonu genellikle gereklidir, çünkü arsenatın negatif yükü negatif yüklü membran yüzeyleri tarafından reddi kolaylaştırmaktadır. Membran teknolojileri, işletme kolaylığı, kimyasal ilave gereksinimleri olmaması ve bakteri, tuzlar ve ağır metaller dahil çoklu kirlenici sınıflarının eş zamanlı giderimi gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak sınırlamalar arasında yüksek sermaye maliyetleri, yüksek basınçlar gerektiren enerji yoğun işletme, potansiyel membran tıkanması ve konsantre bertaraf zorlukları bulunmaktadır.^{5.3}

Adsorpsiyon ve İyon Değişimi

Çeşitli ortamlar kullanan adsorpsiyon teknolojileri, arsenik ve toksik metal giderimi için kapsamlı şekilde çalışılmıştır. Demir bazlı adsorbentler, inorganik arsenik türleri ile demir bileşikleri arasındaki yüksek afinite nedeniyle özellikle etkili olduğu kanıtlanmıştır. Sıfır değerlikli demir (Fe^0), yeraltı suyu ıslahı için geçirgen reaktif bariyerlerde başarıyla kullanılmış ve jeotermal sıvıların ex-situ arıtımı için uyarlanabilmektedir.

İyon değişim reçineleri, özellikle spesifik fonksiyonel gruplara sahip şelat reçineleri, jeotermal sulardan arsenik ve boru seçici olarak giderebilmektedir. Yeni genişletilmiş jel tipi ve epidermal yapıları reçineler bor giderimi için umut verici performans göstermiş, ancak arsenik giderimi verimliliği genellikle eşdeğer reçine konsantrasyonlarında daha düşüktür. İyon değişim reçinelerinin rejenerasyonu bir zorluk oluşturmakta, ancak kireç ile işlenmiş klorür açısından zengin su bazı reçine tiplerini başarıyla rejene edebilmektedir.

Arsenik giderimi için araştırılan diğer adsorbent materyaller arasında aktif alümina, titanyum dioksit, demir hidroksitler, modifiye edilmiş bentonit, metal-organik çerçeveler, biyokömür ve çeşitli mineral oksitler bulunmaktadır. Uygun adsorbent materyallerin seçimi, jeotermal sıvı kimyasına, hedef giderim verimliliğine, rejenerasyon potansiyeline ve maliyet değerlendirmelerine bağlıdır.

5.4 Kimyasal Çöktürme ve Oksidasyon

Arsenitin arsenata oksidasyonu ve ardından demir bileşikleriyle birlikte çöktürülmesi yoluyla kimyasal çöktürme, iyi kurulmuş bir arıtma yaklaşımını temsil etmektedir. Kontrollü pH koşullarında ferrik klorür veya ferrik sülfat ilavesi etkili arsenik giderimi sağlayabilmekte ve çöktürülmüş katılar sedimentasyon ve filtrasyon yoluyla uzaklaştırılmaktadır.

Yeraltı Arsenik Giderimi (SAR) gibi yerinde ıslah yaklaşımları, arsenitin oksitlenmesi ve arsenik-demir komplekslerinin yeraltında çöktürülmesi için anaerobik akiferlere oksijenli su enjekte edilmesini içermektedir. Bu teknoloji jeotermal bölgelerde başarıyla gösterilmiş, ancak reaksiyon kinetiği saatlerden günlere kadar olan kalış sürelerini gerektirmektedir.

Kireç (Ca(OH)_2) kullanan kimyasal yumuşatma prosesleri, kalsiyum, sülfat ve silika dahil kireçlenme iyonlarını giderirken birlikte çöktürme yoluyla arseniği azaltabilmektedir. Kimyasal tüketimini ve çamur üretimini minimize ederken hassas kimyasal reaksiyonları yürütmek için jeotermal uygulamalar için otomatik sürekli karıştırmalı tank reaktör sistemleri geliştirilmiştir.

5.5 Entegre Arıtma Yaklaşımları

Tablo 2, jeotermal sulardan kanserojenik ve toksik maddelerin giderilmesi için kullanılan başlıca arıtma teknolojilerini, tipik giderim verimlilikleri ve işletme değerlendirmeleri ile birlikte özetlemektedir.

Tablo 2: Kanserojenik Madde Giderimi için Arıtma Teknolojileri

Teknoloji	Hedef Kirleticiler	Giderim Verimliliği	Temel Avantajlar
Elektrokoagülasyon	Arsenik, Silika, Ağır Metaller	As: >%95 (4 mg/L'den <0,1 mg/L'ye) Si: >%83 (600'den <100 mg/L'ye)	Düşük kimyasal kullanımı, Basit işletme, Ayrılabilir atık akımları
Ters Ozmoz	Arsenik, Bor, TDS, Tuzlar	As(V): %98-99 As(III): %46-75 Bor: %85-95	Yüksek giderim oranları, Çoklu kirletici giderimi, Kimyasal ilave yok
Nanofiltrasyon	Arsenik, Bor, Çok değerlikli iyonlar	As(V): %90-98 Bor: %50-80	RO'dan daha düşük basınç, Seçici iyon giderimi
İyon Değişimi/Adsorpsiyon	Arsenik, Bor, Ağır Metaller	As: %70-95 Bor: %80-95	Seçici giderim, Yenilenebilir ortam, Esneklik
Kimyasal Çöktürme	Arsenik, Ağır Metaller	As: %85-95 Ağır Metaller: %90-99	Kanıtlanmış teknoloji, Yüksek konsantrasyonlar için etkili, Düşük sermaye maliyeti
Sıfır Değerlikli Demir	Arsenik, Krom	As: %60-90	Pasif arıtma seçeneği, Kimyasal ilave yok, Uzun işletme ömrü

Kaynaklar: Tyrovola ve ark. (2004), An ve ark. (2011), Cermikli ve ark. (2020), Kumar ve ark. (2023)'ten derlenmiştir

Jeotermal sıvıların kapsamlı arıtımı, düzenleyici uyumu sağlamak ve faydalı yeniden kullanımı mümkün kılmak için sıklıkla birden fazla teknolojinin seri olarak entegrasyonunu gerektirmektedir. Tipik bir entegre arıtma treni şunları içerebilir: sedimentasyon veya filtrasyon yoluyla askıda katı madde giderimi için ön arıtma; arsenitin arsenata dönüştürülmesi için pH ayarlaması ve kimyasal oksidasyon; arsenik ve ağır metal giderimi için elektrokoagülasyon veya kimyasal çöktürme yoluyla birincil

arıtma; nihai arsenik ve bor azaltımı için membran filtrasyon veya iyon değişimi yoluyla ikincil saflaştırma; ve desilifikasyon, kimyasal inhibitörler veya kontrollü çöktürme yoluyla silika yönetimi.

Ekonomik analiz, kapsamlı jeotermal su arıtma tesisleri için toplam proje maliyetlerinin ham su kalitesi, arıtma hedefleri ve tesis kapasitesine bağlı olarak yaklaşık 10-78 milyon ABD doları sermaye harcaması ve arıtılmış su metreküpü başına 0,15-2,73 ABD doları işletme maliyeti arasında değiştiğini göstermektedir. Bu maliyetler, arıtılmış suyun faydalı yeniden kullanım değerine ve çevre koruma için yasal gerekliliklere karşı dengelenmelidir.

6. Düzenleyici Çerçeve ve Çevresel Standartlar

Jeotermal sıvıların yönetimi için uluslararası düzenleyici çerçeveler yargı yetkisine göre değişmekle birlikte, genellikle içme suyu kalitesi için Dünya Sağlık Örgütü ve çevre koruması için Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen kılavuzları takip etmektedir. DSÖ'nün arsenik için 10 µg/L maksimum kirletici seviyesi, dünya genelinde yaygın olarak benimsenen bir standart olarak hizmet vermektedir.

Jeotermal atık sıvılarının yüzey sularına deşarjı için deşarj standartları genellikle toksik metaller, arsenik, bor, sıcaklık, pH ve toplam çözünmüş katılara katı sınırlamalar getirmektedir. Birçok yargı yetkisi, üretilen sıvıların jeotermal rezervuara tam olarak yeniden enjekte edilmesini sağlayan kapalı döngü sistemlerinin uygulanmasını gerektirmekte ve yüzey deşarjını ve ilgili çevresel riskleri en aza indirmektedir.

Arıtılmış jeotermal suyun tarımsal sulama, içme suyu temini veya endüstriyel uygulamalar için faydalı yeniden kullanımının önerildiği durumlarda, arıtılmış su amaçlanan kullanım için geçerli kalite standartlarını karşılamalıdır. Bu genellikle arsenik, bor, ağır metaller ve aşırı tuzluluğun sulama suyu kalitesi kılavuzları veya içme suyu standartları ile tutarlı seviyelere kapsamlı arıtmayı zorunlu kılmaktadır.

7. Gelecek Perspektifleri ve Teknolojik Gelişim

Uluslararası Enerji Ajansı, teknolojik ilerleme ve maliyet azaltımının devam etmesi ile jeotermal enerjinin 2050 yılına kadar küresel elektrik talebi artışının %15'ini karşılayabileceğini öngörmekte ve bu da yaklaşık 800 GW kapasite kurulumu ile yıllık yaklaşık 6.000 TWh üretim anlamına gelmektedir. Bu potansiyelin gerçekleşmesi, konvansiyonel hidrotermal sistemlerin ötesindeki derinliklerde ısı kaynaklarına erişebilecek Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (EGS) ve kapalı döngü teknolojilerinin ilerlemesine kritik şekilde bağlıdır.

Yeni nesil jeotermal teknolojileri, jeotermal gelişimin coğrafi dağılımını mevcut volkanik ve tektonik olarak aktif bölgelerdeki yoğunlaşmanın ötesine genişletmeyi vaat etmektedir. 8 km derinliğe kadar EGS'nin tam teknik potansiyeli, dünya çapında yaklaşık 600 TW kapasite olarak tahmin edilmekte ve bu miktar dünya elektrik talebini 140 kez karşılamaya yeterlidir. Ancak ticari yaygınlaştırma, sondaj inovasyonu, rezervuar mühendisliği ilerlemeleri ve ölçek ekonomileri yoluyla önemli maliyet azaltımı gerektirmektedir.

Jeotermal sıvılar için çevresel yönetim teknolojileri gelişmeye devam etmekte olup, gelişmekte olan yaklaşımlar arasında adsorpsiyon için ileri nanomalzemeler, organik kirleticilerin fotokatalitik bozunması, hibrid membran-biyolojik arıtma sistemleri ve jeotermal tuzlu sulardan mineral geri kazanımı bulunmaktadır. Ticari silika üretimi ve nadir toprak elementi ekstraksiyonu gibi ayrılmış kirleticilerin faydalı kullanımları üzerine araştırmalar, atık bertaraf gereksinimlerini azaltırken proje ekonomisini iyileştirebilmektedir⁸. Sonuçlar

Jeotermal enerji, yüksek kapasite faktörleri ile temel yük gücü sağlayan ve çok sayıda ülkede enerji güvenliğine önemli katkıda bulunan küresel yenilenebilir enerji portföyünün kritik bir bileşenini temsil etmektedir. 2024-2025 itibarıyla, küresel kurulu kapasite 35 ülkeye dağılmış yaklaşık 16,9-17,2 GW'a ulaşmış olup, ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda kurulu kapasite açısından liderlik etmektedir.

Jeotermal sıvılarda kanserojenik ve toksik maddelerin yönetimi, uygun arıtma teknolojileri ile ele alınması gereken çevresel ve halk sağlığı zorlukları sunmaktadır. En önemli kanserojenik kirletici olan arsenik, elektrokoagülasyon, membran filtrasyon, demir bazlı adsorpsiyon, kimyasal çöktürme ve iyon değişimi prosesleri yoluyla etkili şekilde giderilebilmektedir. Birden fazla teknolojiyi entegre eden kapsamlı arıtma yaklaşımları, düzenleyici uyumu sağlayabilmekte ve jeotermal suların faydalı yeniden kullanımını mümkün kılabilir.

Hem kaynak geliştirme hem de çevresel yönetim için jeotermal teknolojilerde sürekli ilerleme, dünya genelinde jeotermal enerjinin önemli kullanılmayan potansiyelinin gerçekleştirilmesi için gerekli olacaktır. Uygun düzenleyici çerçeveler ve ekonomik teşviklerle birleştirilen yeni nesil sistemlerin araştırma, geliştirme ve gösterilmesine yapılan yatırım, dünya çapında sürdürülebilir jeotermal enerji kullanımının genişlemesini destekleyebilmektedir.

Kaynaklar

Aksoy, N., Simsek, C., & Gunduz, O. (2009). Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balcova, Turkey. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103(1-2), 13-28.

An, B., Zhao, D., Zhou, B., & Wang, J. (2011). Performances of novel chelating ion exchange resins for boron and arsenic removal from saline geothermal water. *Desalination*, 273(1), 41-49.

Baba, A., Demir, M. M., Koç, G. A., & Tuğcu, C. (2021). Hydrogeological and hydrogeochemical evaluation of geothermal systems in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-18.

Bertani, R., Pasqualetti, M., & Thain, I. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020-2023. *Geothermal Energy*, 12(1), Article 290. Springer Nature. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>

Birkle, P., & Merkel, B. (2000). Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 124(3-4), 371-410.

Cermikli, E., Sen, F., Altıok, E., Wolska, J., Cyganowski, P., & Kabay, N. (2020). Performances of novel chelating ion exchange resins for boron and arsenic removal from saline geothermal water using adsorption-membrane filtration hybrid process. *Desalination*, 491, Article 114548.

Demir Yetiş, A., & Ozguven, A. (2020). Heavy metal accumulation and health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-15.

International Energy Agency (IEA). (2024). *The Future of Geothermal Energy*. IEA Publications, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy> adresinden erişilmiştir.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *Renewable Capacity Statistics 2024*. IRENA, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy> adresinden erişilmiştir.

Kumar, M., Goswami, R., Patel, A. K., Srivastava, M., & Das, N. (2023). Arsenic removal technologies and future trends: A mini review. *Journal of Cleaner Production*, 278, Article 123805.

Medrano, M. J., Boix, R., Pastor-Barriuso, R., et al. (2010). Arsenic in public water supplies and cardiovascular mortality in Spain. *Environmental Research*, 110(5), 448-454.

REN21. (2025). *Renewables 2025 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. <https://www.ren21.net/gsr-2025/technologies/geothermal/> adresinden erişilmiştir.

ThinkGeoEnergy. (2025). *Top 10 Geothermal Countries 2024 - Power Generation Capacity*. <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2024-power/> adresinden erişilmiştir.

Tyrovola, K., Nikolaidis, N. P., & Veranis, N. (2004). Arsenic removal from groundwater using zero-valent iron: Pilot application in geothermal regions. Technical University of Crete, PROTECTION2004 Konferans Bildirileri.

World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. WHO Press, Cenevre.