



Dünya Çapında Jeotermal Enerjinin Karbon Ayak İzi Üzerindeki Etkisi: Bölgesel Analiz ve Sürdürülebilirlik Boyutu

Esra Nur Kendirci^{1*}, Fatma Didem Tunçez¹

¹Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı, KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, Türkiye

E-Posta: esraaydin668@gmail.com, didem.tuncez@karatay.edu.tr

Gönderim 24.06.2025; Kabul 26.06.2025

Özet: Jeotermal enerji, sürdürülebilir ve düşük karbonlu enerji kaynakları arasında yer almakla birlikte, karbon ayak izi bakımından bölgeden bölgeye değişen sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu makalede, dünya genelinde jeotermalin kullanımı, karbon salımı üzerindeki etkisi ve önde gelen üretici ülkeler özelinde yapılan değerlendirmelerle birlikte sunulmuştur. Veriler tablolarla desteklenmiş, özgün yorumlarla akademik bir perspektif sunulmuştur. Ayrıca, bölgesel jeolojik farklılıkların karbon ayak izi üzerindeki belirleyici etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, karbon ayak izi, yenilenebilir enerji, çevresel etki değerlendirmesi (ÇED)

The Impact of Geothermal Energy on Carbon Footprint Worldwide: A Regional Analysis and Sustainability Demension

Received 24.06.2025; Accepted 26.06.2025

Abstract: Geothermal energy is considered a sustainable and low-carbon energy source, yet its carbon footprint can vary significantly by region. This paper examines the global implications of geothermal energy on carbon emissions through a regional lens, supported by empirical data and cross-country comparisons. It draws from the GEOENVI Environmental Impact Assessment guidelines and the global geothermal energy development report to identify best practices and critical challenges. The findings reveal that while countries like Iceland and Kenya exhibit low emissions due to effective reinjection systems, nations such as Turkey and Italy still face high carbon intensities. The paper argues for integrated environmental planning, policy harmonization, and technological interventions to maximize the net-zero potential of geothermal power.

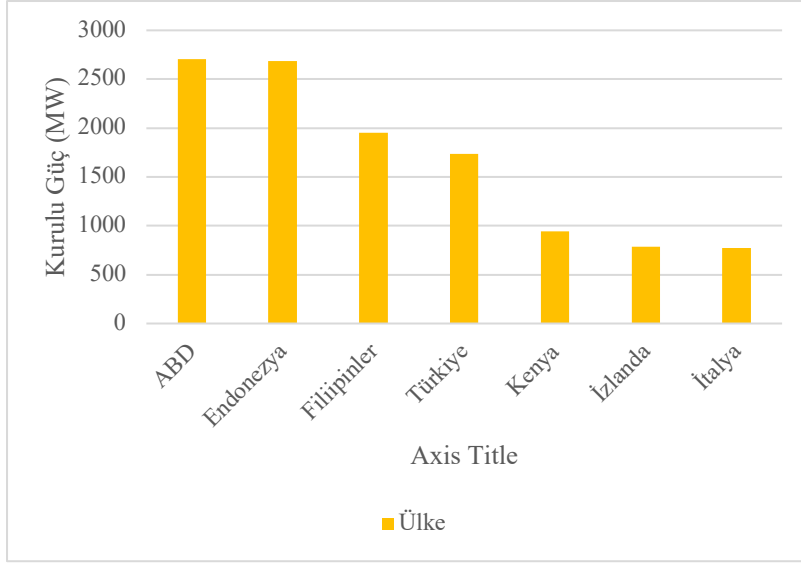
Key Words: Geothermal energy, carbon footprint, renewable energy, environmental impact assessment (EIA)

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde öne çıkan jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde birikmiş olan ısının değerlendirilmesi yoluyla hem elektrik üretimi hem de doğrudan ısıtma sistemleri için kullanılabilir. Jeotermal enerjinin önemli avantajlarından biri, sürekli üretim yapabilmesi ve baz yük santrali olarak işlev görebilmesidir. Bu yönüyle güneş ve rüzgar gibi kesintili kaynaklardan ayrılır ve enerji arz güvenliğine önemli katkı sağlar.

Dünya genelinde jeotermal enerji, özellikle tektonik olarak aktif bölgelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA, 2023) göre, 2024 yılı itibariyle ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye, Kenya, İzlanda ve İtalya gibi ülkelerde bu alanda başı çekmektedir. Bu ülkelerdeki kurulu güçler, sadece enerji üretim kapasitelerini değil, aynı zamanda sürdürülebilir enerjiye geçişteki iradeyi de yansıtmaktadır.

* İlgili E-posta / Corresponding E-mail: esraaydin668@gmail.com (ORCID: 0009-0004-4814-4238)



Şekil 1. Dünya Geneline Önde Gelen Ülkelerin Jeotermal Enerji Kurulu Güçleri^[12].

Şekil 1, dünya genelinde jeotermal enerjiye dayalı kurulu elektrik üretim kapasitesine sahip ülkeleri göstermektedir. ABD, yaklaşık 2.700 MW ile listenin başında yer alırken, Endonezya (2.300 MW) ve Filipinler (1.900 MW) onu takip etmektedir. Türkiye ise 1.734 MW kurulu güç ile jeotermal enerjide dünya sıralamasında dördüncü sıradadır.

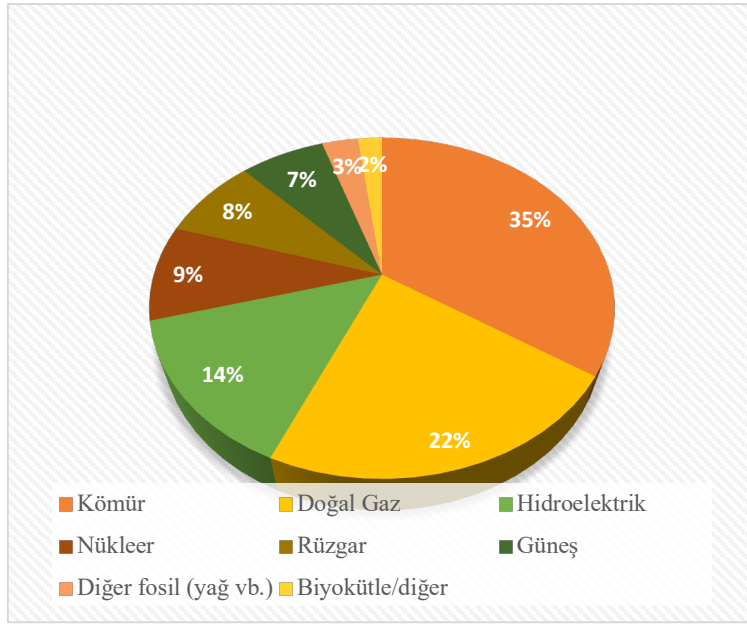
Bu veriler, Türkiye'nin son yıllarda jeotermal enerji yatırımlarında önemli bir atılım gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Batı Anadolu'da yer alan yüksek sıcaklıklı rezervuarların etkin kullanımıyla, Türkiye Avrupa'da lider konuma gelmiş ve küresel ölçekte de önde gelen üreticilerden biri olmuştur.

Jeotermal enerjinin bu denli yaygınlaşması, Türkiye'nin yerli ve yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji arz güvenliğini artırmasının yanı sıra, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlaması açısından da büyük önem taşımaktadır.

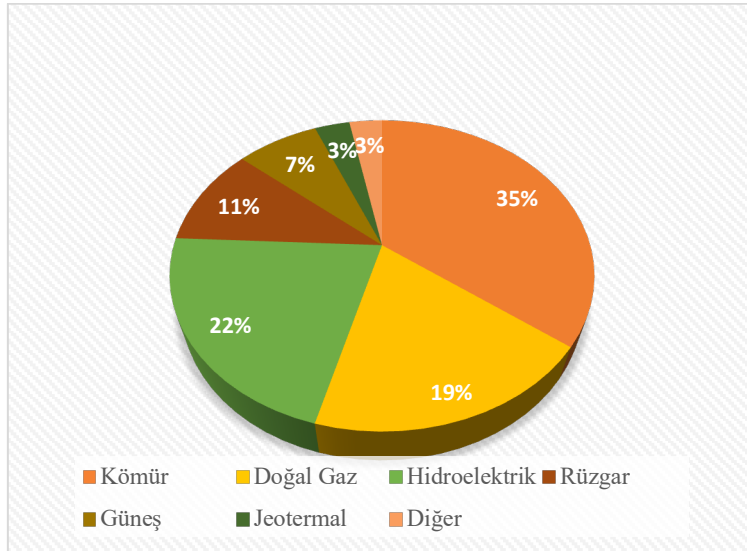
ELEKTRİK ÜRETİMİNDE ENERJİ KAYNAKLARININ DAĞILIMI: KÜRESEL VE TÜRKİYE PERSPEKTİFİ

Elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının dağılımı, ülkelerin enerji politikalarını, kaynak bağımlılıklarını ve çevresel etkilerini doğrudan etkilemektedir. Fosil yakıtların yoğun kullanımı, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliği üzerindeki baskıyı artırırken; yenilenebilir kaynakların payının artması, düşük karbonlu enerji dönüşümünü teşvik etmektedir. Bu bağlamda jeotermal enerji, sürdürülebilirliği ve baz yük üretimine uygun yapısıyla bu dönüşüm sürecinde önemli bir rol üstlenmektedir.

Türkiye'de 2024 yılı itibarıyla elektrik üretiminde kullanılan başlıca enerji kaynaklarının dağılımı içinde jeotermalden üretilen elektrik enerjisi Dünya'da elektrik enerjisi üretimi içindeki jeotermal kaynağın payından fazladır (Şekil.2-3)



Şekil 2. Dünya’da Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynaklar^[7]



Şekil 3. Türkiye’de Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynaklar^[13]

Şekil 2 ve Şekil 3, jeotermal enerjinin toplam elektrik üretimi içindeki payını dünya genelinde ve Türkiye özelinde karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Küresel düzeyde jeotermal kaynaklar elektrik üretiminin yaklaşık %0,6’sını oluştururken, Türkiye’de bu oran %3 seviyesindedir.

Bu farklılık, Türkiye’nin jeotermal enerjiye verdiği stratejik önemi yansıtmaktadır. Sınırlı fosil kaynaklara sahip bir ülke olarak Türkiye, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş; bu doğrultuda jeotermal enerjiye yapılan yatırımlar sayesinde dünya ortalamasının oldukça üzerinde bir kullanım oranına ulaşmıştır.

Jeotermalin Türkiye elektrik üretimindeki payının artması, yalnızca enerji arz güvenliğini pekiştirmekle kalmamakta; aynı zamanda sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayarak ulusal ve uluslararası sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir.

JEOTERMAL ENERJİNİN KARBON AYAK İZİ

Karbon ayak izi; insanların bir yıl içinde doğaya bıraktığı eşdeğer karbondioksit miktarının belirlenmesi ile bulunur. Ekolojik ayak izi ile insanlığın çevre üzerindeki etkisi değerlendiriliyor.

Karbon ayak izinden elde edilen veriler ülkelere farkındalık oluşturup, sera gazı salınımını azaltarak daha yaşanabilir bir dünya oluşturmak adına hayati önem taşımaktadır.

Jeotermal enerji sistemlerinde karbon salımının temel kaynağı, yeraltı rezervuarlarında doğal olarak bulunan gazların (özellikle CO₂ (Karbondiyoksit) ve H₂S (Hidrojen Sülfür)) yüzeye çıkmasıdır. Ancak bu salımlar, kullanılan teknolojiye bağlı olarak büyük oranda kontrol altına alınabilir. Flash ve binary sistemlerde salımlar düşüktür; buna karşın dry steam (kuru buhar) sistemleri veya süper kritik sistemlerde emisyonlar daha yüksek olabilir. Ayrıca, santralin bulunduğu jeolojik yapının da etkisi büyüktür. Örneğin karbonatlı kayaçlara sahip sahalarda, rezervuar sıvılarındaki CO₂ konsantrasyonu daha yüksek olabilir^[3].

IPCC'nin raporuna göre, jeotermalin ortalama emisyonu 38 g CO₂e/kWh'dir.^[6], ancak bu rakam bazı bölgelerde 1.000 g CO₂e/kWh'ye kadar çıkabilmektedir.

JEOTERMAL ENERJİNİN ÇEVRESEL PROFİLİNE GENEL BAKIŞ

Jeotermal enerji üretimi, çevresel etkileri açısından iki ana başlık altında değerlendirilmektedir: birincisi arama ve inşaat gibi ön üretim faaliyetlerinin oluşturduğu etkiler; ikincisi ise işletme aşamasındaki çevresel sonuçlardır. Arama ve sondaj süreçleri sırasında oluşan yüzey bozulmaları, ulaşım faaliyetlerinin neden olduğu emisyonlar ve yerel ekosistem üzerindeki etkiler bu kapsamda ele alınır. İşletme sürecinde ise açığa çıkan gazlar, gürültü kirliliği, yüzey ve yeraltı su sistemleri üzerindeki etkiler gibi faktörler çevresel hassasiyet gerektirir^[9].

Sondaj sırasında jeotermal akışkanın özellikleri nedeniyle çeşitli riskler oluşabilir. İçerdiği bor bileşikler nedeniyle bu akışkan tarımda sulama için uygun değildir. Ayrıca yapısındaki CO₂ ve H₂S gibi gazların serbest kalması, hava kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu risklerin azaltılmasında en etkili yöntemlerden biri reenjeksiyon uygulamasıdır. Bu yöntemle kullanılan akışkan tekrar yer altına gönderilerek hem çevresel etki azaltılır hem de rezervuar basıncı korunur^[10].

Jeotermal enerji kaynaklarının çevreye duyarlı şekilde kullanılabilmesi için avantajlarının yanı sıra sınırlayıcı yönlerinin de dikkate alınması gerekir. Enerjinin yerel bir kaynak olması, sürdürülebilirliği, düşük maliyeti ve fosil yakıtlara kıyasla çevreye daha az zarar vermesi önemli avantajlardır^[8]. Ancak kaynakların bölgesel farklılık göstermesi, etüt çalışmalarının uzun sürmesi, sıcaklık seviyelerinin yeterli olmaması ve yüksek mineral içeriğinin yaratabileceği teknik sorunlar dikkatle yönetilmelidir^[4].

Türkiye örneği bu açıdan dikkat çekicidir. Jeotermal akışkanlar burada merkezi konut ısıtması, sera ısıtması ve termal turizm gibi çeşitli alanlarda kullanılmakta; uygulama yapılan şehirlerde hava kalitesinde belirgin iyileşmeler sağlanmaktadır. Doğru mühendislik çözümleriyle kurulan sistemler hem ilk yatırım maliyeti hem de işletme giderleri açısından oldukça avantajlıdır. Bununla birlikte, çevre dostu bir yaklaşım için kaynakların dikkatli yönetilmesi ve teknolojik uygulamaların geliştirilmesi gerekmektedir.

Jeotermal enerji, sınırsız bir kaynak yapısına sahip olması, düşük karbon salımı ve ekonomik işletim avantajları sayesinde enerji arz güvenliğine katkı sunarken, sürdürülebilir kalkınma hedefiyle de uyumludur. Türkiye gibi enerji ithalatına bağımlı ülkeler için yerli yenilenebilir bir çözüm sunarken, çevresel yükleri minimize edebilme potansiyeli, bu kaynağın daha yaygın kullanımı için güçlü bir temel oluşturmaktadır^[5].

JEOTERMAL PROJELERDE ÇEVRESEL ETKİ YÖNETİMİ: AVRUPA STANDARTLARI VE GEOENVI YAKLAŞIMI

GEOENVI projesi kapsamında Avrupa Birliği tarafından geliştirilen çevresel etki değerlendirme yaklaşımı, jeotermal projelerin yaşam döngüsü boyunca (arama, kurulum, işletme, kapatma) çevresel etkilerinin sistematik olarak analiz edilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, yalnızca doğrudan etkileri (gaz salımı, gürültü, yeraltı suyu kullanımı) değil, aynı zamanda dolaylı ve kümülatif etkileri de göz önünde bulundurur. Projelerde etkili bir çevresel yönetim planının geliştirilmesi için yüzey suyu, yeraltı suyu, hava kalitesi, sismisite, toprak kullanımı ve halk sağlığı gibi başlıklar ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, bu değerlendirme yalnızca teknik kriterlere değil, toplumsal kabul ve kamu politikalarına uyum düzeyine de odaklanmaktadır.

KÜRESEL JEOTERMAL ÜRETİM: BERTANI RAPORU (2010-2015)

Ruggero Bertani tarafından hazırlanan 2015 Dünya Jeotermal Enerji Üretimi Raporu'na göre, 2010-2015 döneminde küresel jeotermal kurulu gücünde yaklaşık %16'lık bir artış gözlenmiştir. Bu

artışa en büyük katkıyı ABD, Endonezya, Kenya ve Türkiye gibi ülkeler sağlamıştır. Türkiye'nin kurulu gücü 91 MW'den 397 MW'ye çıkarak %336'lık bir artış göstermiştir. Bu hızlı gelişme, karbon ayak izinin kontrolü konusunda daha fazla izleme ve yönetim ihtiyacını doğurmaktadır. Bertani, jeotermalin büyüme potansiyelinin yüksek olduğunu ancak çevresel sürdürülebilirlik kriterleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 1. Seçili Ülkelerde Jeotermal Kurulu Güç ve Üretim Artışı (2010-2015) ^[2]

ÜLKE	Kurulu Güç 2010 (MW)	Kurulu Güç 2015 (MW)	Artış (%)	2015 Üretim (GWh)
Türkiye	91	397	336	3.127
ABD	3.098	3.450	11	16.600
Kenya	202	594	194	2.848
İzlanda	575	665	16	5.245
Endonezya	1.197	1.340	12	9.600

Tablodan da görülebileceği gibi, Türkiye ve Kenya gibi ülkelerde jeotermal enerji kurulu gücünde büyük oranlı artışlar gözlenmektedir. Ancak emisyon kontrolü ve çevresel sürdürülebilirlik uygulamaları aynı hızda gelişmemiştir. Bu nedenle, teknolojik büyümenin yanında çevresel yönetim sistemlerinin de eş zamanlı olarak gelişmesi gerekmektedir.

KÜRESEL DAĞILIM VE BÖLGESEL ANALİZ GÜNCEL BAKIŞ

Jeotermal enerji üretimi dünya genelinde belirli ülkelerde yoğunlaşmış olup, bu ülkeler genellikle jeolojik olarak aktif bölgelerde yer almaktadır. Tektonik hareketliliğin yoğun olduğu bölgeler –özellikle Pasifik Ateş Çemberi kuşağı- jeotermal enerji potansiyeli açısından öne çıkmaktadır. 2024 yılı itibariyle jeotermal enerjide lider konumda bulunan ülkeler ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye, Kenya, İzlanda ve İtalya yer almaktadır.

Bu ülkelerin üretim kapasiteleri ve karbon ayak izi performansları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

Tablo 2. Jeotermal Enerji Üretiminde Önde Gelen Ülkeler ve Karbon Ayak İzi Performansları (2024) ^[7]

Ülke	Kurulu Güç (MW)	Elektrik Üretimindeki Payı (%)	Ortalama Emisyon (g CO ₂ e/kWh)
ABD	2.703	0,6	45-107
Endonezya	2.688	18,8	60-85
Filipinler	1.952	21,0	70-110
Türkiye	1.734	3,0	400-1.500
Kenya	940	33,7	40-60
İzlanda	788	26,8	20-78
İtalya	772	1,1	400-1.300

Bu veriler, jeotermal enerjinin karbon salımı açısından ne derece değişken olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, İzlanda ve Kenya gibi ülkelerde düşük emisyonlu üretim sistemleri tercih edilirken, İtalya ve Türkiye'de karbon salımı daha yüksektir. Bunun temel nedeni, bazı bölgelerde rezervuar sıvılarının daha yüksek oranda CO₂ içermesi ve reenjeksiyon uygulamalarının yeterince etkin olmamasıdır ^[2].

ABD, hem araştırma hem de teknolojik altyapı açısından sektöre yön vermeye devam etmektedir. Binary sistemlerin yaygın kullanımı sayesinde karbon emisyonları düşük tutulmakta, jeotermalin baz yük enerjisi üretiminde yeri giderek artmaktadır. Endonezya ve Filipinler ise tropikal iklimde, jeotermalin yaygın ve verimli kullanımı sayesinde enerji arz güvenliğinde önemli adımlar atmaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Türkiye’de sürdürülebilir kalkınma çabaları kapsamında, karbon ayak izi önemli bir gösterge olarak öne çıkmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma; gelecek nesillerin ihtiyaçlarını göz ardı etmeden, ekonomik faktörlerde iyileştirmeler yaparak gelişmiş ülkeler düzeyine ulaşmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda kalkınmanın devamlılığını sağlamak ve ölçmek için karbon ayak izi gibi çevresel göstergeler kritik önemdedir. Türkiye’de karbon ayak izinin ekolojik ayak izi içindeki payı %46’dır ^[1]. Bu yüksek oran, Türkiye’nin enerji üretim ve ithalat ağırlıklı yapısı ile ulaşım sistemine dayalı emisyon yoğunlukları ile açıklanabilir.

Jeotermal enerji, küresel anlamda düşük karbon salımı ve yenilenebilirliği ile öne çıkan stratejik bir enerji kaynağıdır. Ancak karbon ayak izi, santral tasarımı rezervuar kimyası, teknolojik altyapı ve çevresel yönetim sistemlerine göre büyük oranda değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, jeotermalin karbon nötr potansiyelinden tam olarak yararlanabilmesi için sadece rezervuar sıcaklığı değil, çevresel sürdürülebilirlik ölçütleri de değerlendirmelidir.

Türkiye örneği, teknik potansiyele rağmen karbon ayak izinin düşürülebilirliğinin mevcut uygulamalara bağlı olduğunu göstermektedir. Reenjeksiyon sistemlerinin yaygınlaştırılması, jeotermal santrallerde gaz kontrol teknolojilerinin artırılması ve enerji verimliliğine dayalı yeni tasarımlar, bu kaynağın çevreye olan etkisini en aza indirecektir.

Küresel enerji dönüşümünde jeotermalin daha yaygın ve verimli kullanımı için politika yapıcılar, yatırımcılar ve mühendislik topluluklarının koordineli çalışması kaçınılmazdır. Düşük karbon hedefleri ile örtüşen bu kaynak, doğru yönetildiğinde hem iklim değişikliğiyle mücadeleye hem de enerji arz güvenliğine katkı sağlayacaktır.

Jeotermal enerji, düşük karbon salımı ve sürdürülebilir yapısıyla enerji dönüşüm süreçlerinde önemli bir yol oynamaktadır. Ancak bu potansiyel, sadece rezervuar sıcaklığı ve kaynak mevcudiyetiyle değil; aynı zamanda çevresel etki yönetimi, teknolojik altyapı, politik düzenlemeler ve toplumun bu kaynaklara yaklaşımıyla da doğrudan ilişkilidir. Bertani (2015) verileri, hızlı büyüyen ülkelerde emisyon yoğunluğunun artabildiğini gösterirken, GEOENVI kılavuzu ise bu tür projelerde entegre çevresel planlamanın gerekliliğini vurgulamaktadır.

Türkiye örneği, potansiyel ile uygulama arasındaki uçurumu somut olarak ortaya koymaktadır. Reenjeksiyon sistemlerinin artırılması, emisyon kontrol teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve Avrupa EIA standartlarına uyum, bu potansiyelin daha çevreci bir yaklaşımla değerlendirilmesini mümkün kılacaktır.

Sonuç olarak jeotermal enerjinin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir biçimde yaygınlaştırılması için disiplinlerarası bir yaklaşım, katılımcı planlama ve etkili çevresel yönetim stratejileri kaçınılmazdır.

KAYNAKLAR

- [1] Barata, A. (2021). GEOENVI-EIA-Guidelines-final-draft_HE_31052021. Avrupa Birliği GEOENVI Projesi Yayını.
- [2] Bertani, R. (2022). World Geothermal Congress Reports. World Geothermal Congress Yayınları..
- [3] Bloomfield, K., Moore, J. & Neilson, R. (2003). Geothermal Energy and the Environment. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory.
- [4] Demirel, T. (1998). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine. Ankara: Gazi Üniversitesi Yayınları..
- [5] Durgut, M. (2005). Enerji Politikaları ve Jeotermal Enerji. İstanbul: Beta Yayıncılık.
- [6] IPCC. (2022). Sixth Assessment Report – Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [7] IRENA. (2023). Global Renewables Outlook 2023. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications>.
- [8] Okul, A. (2001). Jeotermal Enerjide Yatırım Kriterleri. İzmir: Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- [9] Yıldırım, N. (2003). Jeotermal Enerji Çevresel Etkileri Raporu I. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü.

- [10] Yıldırım, N. (2005). Jeotermal Enerji Çevresel Etkileri Raporu II. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü.
- [11] Eşitti, E. & Duran, M. (2018). “Çanakkale Turizminin Karbon Ayak İzi Üzerine Bir Araştırma”
Jornual Of Awareness
- [12] IRENA. (2023). Global Renewables Outlook 2023. International Renewable Energy Agency.
<https://www.irena.org/publications>. Verilerine göre yazar tarafından oluşturulmuştur.
- [13] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 2024. Elektrik Üretim İstatistikleri Raporu.
www.teias.gov.tr