



Çan İlçesinin (Çanakkale, KB Türkiye) Jeotermal Kaynakları ve Madencilik Potansiyelinin Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi Perspektifinden Değerlendirilmesi
Geothermal Resources and Mining Potential of the Çan District (Çanakkale, NW Türkiye): A Sustainable Resource Management Perspective

Deniz Şanlıyüksel Yücel*

*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Terzioğlu Kampüsü, Mühendislik Fakültesi,
Maden Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye*

• Geliş/Received: 12.04.2026 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 17.08.2026 • Kabul/Accepted: 18.08.2026
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 29.08.2026 • Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Bu çalışma, Biga Yarımadası'nın jeoekonomik odak noktasında yer alan Çan (Çanakkale) ilçesinin jeotermal kaynak, metalik maden, endüstriyel hammadde ve linyit potansiyelini su-enerji-maden bütünlüğüne dayalı sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifiyle değerlendirmektedir. Değerlendirme; saha çalışmaları, fizikokimyasal ölçümler, hidrojeokimyasal analizler ve kurumsal verilere dayanmaktadır. Düşük-orta entalpili jeotermal alanlardan Bardakçılar, Karılca ve Çan-Merkez termal ve sağlık turizminde kullanılırken, Alibeyçiftliği'nde tesis bulunmamakta, kaynak yerel halk tarafından kullanılmaktadır. En yüksek kuyu içi sıcaklıklar Bardakçılar'da (750 m, 67 °C) ve Karılca'da (450 m, 61,9 °C) ölçülmüştür. Jeotermometre hesaplamaları, rezervuar sıcaklıklarının ölçülen kuyu içi sıcaklıklarından daha yüksek olabileceğini göstermekte ve kademeli kullanım olanaklarına işaret etmektedir. Bölgenin metalik maden zenginliği; Halilağa (Cu-Au) porfiri sistemi, Ağı Dağı (Au-Ag), Kocayayla (Pb-Zn ± Cu) ve Kumarlar (Pb-Zn-Cu ± Au) epitermal sistemleri ve antik metalürjiyle ilişkili Yuvalar (Fe-Cu) skarn yatağı ile temsil edilmektedir. Cevherleşme sistemlerinin polimetallik doğası Ge, Mo ve Sb gibi elementlerin yan ürün olarak geri kazanımı açısından potansiyel sunmakta olup ayrıntılı araştırmayı gerektirmektedir. Endüstriyel hammadde kaynakları ise seramik sanayisinin temel girdilerini oluşturan kaolin, sileks, kuvars ve feldispat rezervlerinin yanı sıra çimento ve inşaat sektöründe kullanılan kalker ile dekoratif malzeme olarak değerlendirilen Çan taşından oluşmaktadır. Yaklaşık 92,5 milyon ton linyit rezervine sahip havzada, toplam 650 MW kurulu güce sahip iki termik santral bulunmaktadır. Madencilik sektörü, yaklaşık 7.000 kişilik doğrudan istihdam ile yerel ekonominin temel bileşenlerinden olup, sektörel bağımlılık ve düşük kadın istihdam oranı sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik riski yaratmaktadır. Asit kaya/maden drenajı ekosistem üzerinde çevresel riskler oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, termik santrallerden açığa çıkan uçucu küllerin asidik drenaj nötralizasyonunda ve pasaların oksidasyonunun sınırlandırılmasında değerlendirilmesi döngüsel ekonomi önerileri arasındadır. Rehabilitasyon edilen linyit sahasında kurulan güneş enerjisi santrali, madencilik sonrası arazi kullanımına somut örnek oluşturmakta; benzer uygulamaların yaygınlaştırılması gerekmektedir. Yapılacak detaylı jeofizik araştırmalar ve derin sondajlarla jeotermal enerji kullanım alanlarının artırılması bölge için önem taşımaktadır. Bulgular, ekonomik büyümeyi sosyal kapsayıcılık ve ekolojik korumayla dengeleyen bütüncül adımların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biga Yarımadası, Çan, döngüsel ekonomi, jeotermal sistemler, madencilik potansiyeli, su-enerji-maden etkileşimi, sürdürülebilir kaynak yönetimi.

Abstract: This study evaluates the geothermal resource, metallic ore, industrial raw material, and lignite potential of the Çan district (Çanakkale), located at the geo-economic focal point of the Biga Peninsula, from the perspective

of sustainable resource management based on water-energy-mining nexus. The evaluation is based on field studies, physicochemical measurements, hydrogeochemical analyses, and institutional data. Among the low- to medium-enthalpy geothermal fields, Bardakçılar, Karailıca, and Çan-Merkez are utilized for thermal and health tourism, whereas Alibeyçiftliği lacks facilities, with the resource being used directly by local residents. The highest downhole temperatures were measured at Bardakçılar (750 m, 67 °C) and Karailıca (450 m, 61.9 °C). Geothermometer calculations indicate that reservoir temperatures may exceed the measured downhole temperatures, pointing to the possibility of cascade utilization. The metallic ore endowment of the region is represented by the Halılağa (Cu-Au) porphyry system; the Ağı Dağı (Au-Ag), Kocayayla (Pb-Zn ± Cu), and Kumarlar (Pb-Zn-Cu ± Au) epithermal systems; and the Yuvalar (Fe-Cu) skarn deposit, associated with ancient metallurgy. The polymetallic nature of these mineralization systems offers potential for the by-product recovery of elements such as Ge, Mo, and Sb, warranting further detailed investigation. The industrial raw material resources, in turn, comprise kaolin, siliceous, quartz, and feldspar reserves — the primary inputs of the ceramics industry — together with limestone used in the cement and construction sectors, and Çan stone, valued as a decorative material. The basin, which holds approximately 92.5 million tons of lignite reserves, hosts two thermal power plants with a combined installed capacity of 650 MW. The mining sector, providing direct employment for approximately 7,000 people, constitutes one of the main components of the local economy; however, sectoral dependency and the low female employment rate pose a risk to socio-economic sustainability. Acid rock/mine drainage poses environmental risks to the ecosystem. In this regard, the utilization of fly ash generated by thermal power plants in the neutralization of acidic drainage and in limiting the oxidation of waste rock is among the proposed circular economy measures. The solar power plant established on the rehabilitated lignite site constitutes a concrete example of post-mining land use, and the wider adoption of similar applications is warranted. Expanding the range of geothermal energy use in the region through detailed geophysical surveys and deep drilling is of particular importance. The findings underscore the necessity of holistic measures that balance economic growth with social inclusivity and ecological conservation.

Keywords: Biga Peninsula, circular economy, Çan, geothermal systems, mining potential, sustainable resource management, water-energy-mining nexus.

GİRİŞ

Türkiye, dünyanın sismik açıdan en aktif kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya dağ kuşağı üzerinde, Afrika, Arap ve Avrasya levhaları arasındaki karmaşık bir tektonik rejim içerisinde yer almaktadır (McKenzie, 1972; Taymaz vd., 1991; Bozkurt, 2001; Gürer vd., 2021). Bu tektonik konum, ülke genelinde yoğun ve sürekli bir sismik aktivitenin gelişmesine neden olmaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayımlanan güncel deprem katalogları, 2025 yılı boyunca Türkiye genelinde yüksek düzeyli sismik aktivitenin sürdüğünü göstermektedir. AFAD verilerine göre, 2025 yılında Türkiye genelinde toplam 50.589 deprem meydana gelmiş ve bu depremlerden 12'sinin moment büyüklüğü $M_w \geq 5$ olarak kaydedilmiştir. Sismik aktivitenin özellikle Marmara Denizi ile Balıkesir (Sındırgı) çevresinde yoğunlaştığı ve bu alanların bölgesel ölçekte belirgin bir sismotektonik hareketlilik sergilediği görülmektedir (AFAD, 2026).

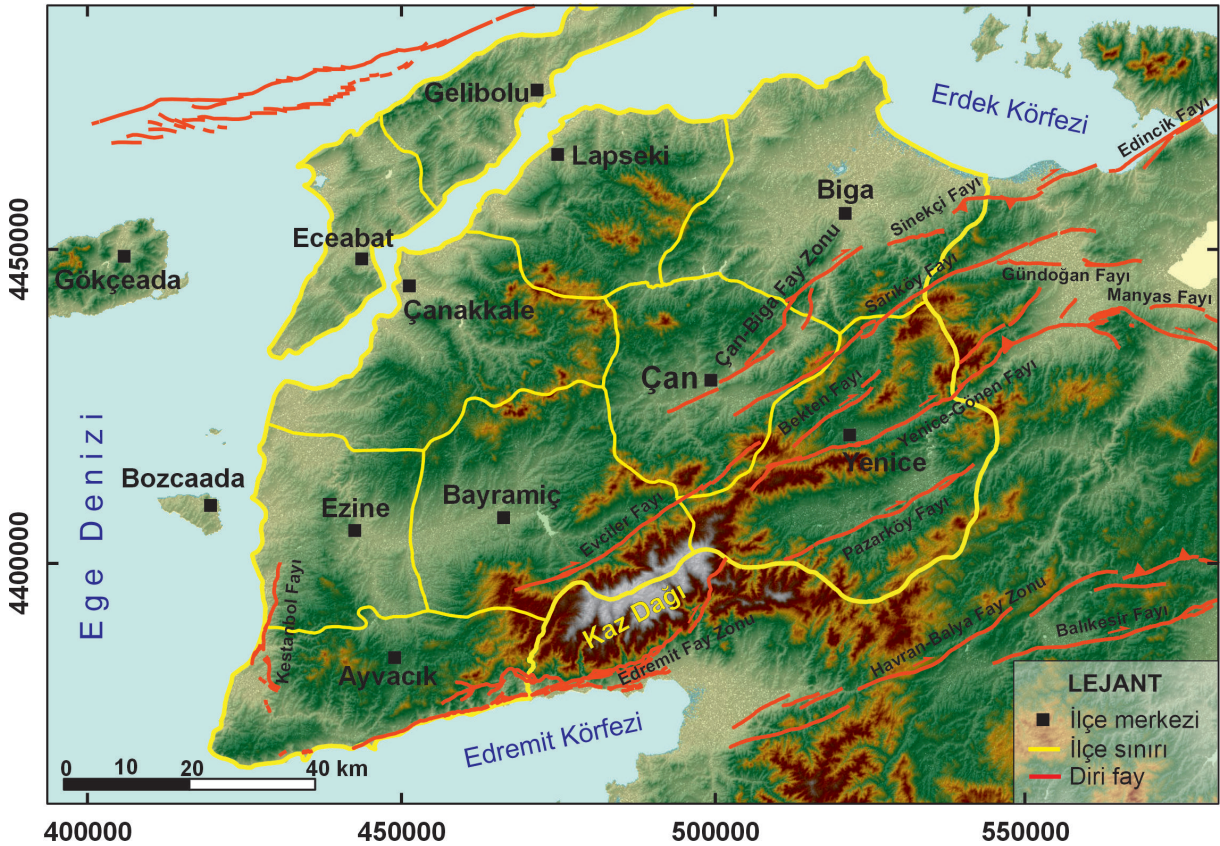
Türkiye'nin güncel tektonik yapısını belirleyen Neotektonik rejim, Orta-Geç Miyosen döneminde Arap, Afrika ve Avrasya levhaları arasında gerçekleşen kıta-kıta çarpışması ile başlamıştır. Bu çarpışma süreci, Türkiye'nin en önemli tektonik unsurları olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) gelişimine zemin hazırlamıştır. Günümüzde bu iki ana fay zonu arasında yer alan Anadolu levhası batıya doğru bir kaçış tektoniği sergilerken, fayların doğusunda kalan Doğu Anadolu Bölgesi ise sıkışma rejimi altında yükselmektedir (Şengör vd., 2008; Özalp vd., 2016).

KAFZ, doğuda Karlıova'dan başlayarak batıda Saros Körfezi'ne kadar uzanan, yaklaşık 1.500 km uzunluğunda, sağ yanal doğrultu atımlı ve yüksek sismik aktiviteye sahip bir fay sistemidir (Barka ve Gülen, 1988). Batı Anadolu'nun şekillenmesinde ise Ege Graben Sistemi (EGS) belirleyici rol oynamaktadır. Bu sistem, Anadolu

levhasının batıya doğru kaçışı ile Helen dalmabatma zonunun geri çekilmesi etkisinin birleşimi sonucunda, bölgenin güneybatıya doğru genişlemesiyle oluşmuştur (McKenzie, 1978; Dewey ve Şengör, 1979). Bu karmaşık tektonik etkileşim sonucunda kabuk incelmış; horst ve graben yapıları ile Batı Anadolu günümüzdeki karakteristik morfolojisini kazanmıştır (Taymaz vd., 1991; Özkaymak ve Sözbilir, 2012).

Biga Yarımadası, batıda Kuzey Ege Denizi, kuzeyde Marmara Denizi, güneybatıda Edremit Körfezi ve doğuda Havran-Manyas hattı ile sınırlanmıştır, sismik açıdan aktif bir deformasyon alanıdır (Koçyiğit, 2009). Bölge, hem KAFZ'nin güney kolunun batıya doğru hareketinin hem de Batı Anadolu'da hâkim olan

kuzey-güney yönlü genişleme rejiminin ortak etkisi altındadır (Westaway, 1994; Barka ve Reilinger, 1997). Emre vd. (2012, 2013) tarafından Edincik, Sinekçi, Manyas, Yenice-Gönen, Sarıköy, Bekten, Evciler, Gündoğan, Kestanbol, Pazarköy, Edremit, Çan-Biga ve Balıkesir faylarının Holosen dönemde aktif (diri fay) özellik taşıdığı ortaya konmuştur. Çanakkale ili, bu karmaşık tektonik sistemin merkezinde, Biga Yarımadası'nın büyük bir bölümünü kaplamaktadır (Şekil 1). Bölgedeki deformasyon rejimi ağırlıklı olarak KD-GB, KKB-GGD ve D-B doğrultulu fay sistemleri tarafından kontrol edilmektedir (Sözbilir vd., 2018). Çanakkale, tarihsel ve aletsel dönemde can ve mal kayıplarına yol açan çok sayıda orta ve büyük ölçekli depreme maruz kalmıştır (Emre vd., 2012).



Şekil 1. Çanakkale ili ve yakın çevresinde bulunan diri fayların dağılımı (Emre vd., 2013).

Figure 1. Distribution of active faults in Çanakkale Province and its vicinity (Emre et al., 2013).

Türkiye’deki jeotermal alanların dağılımı; aktif fay sistemleri, genç volkanizma ve yaygın hidrotermal alterasyon zonlarının mekânsal dizilimi ile paralellik göstermektedir (Şimşek, 2002). Ülke genelinde 30 °C üzerinde sıcaklığa sahip 2.000’den fazla jeotermal kaynak ve kuyu tespit edilmiştir. Bunlar arasında İç Anadolu’da açılan bir kuyuda 3.845 m derinlikte ölçülen 341 °C’lik kuyu dibi sıcaklığı, Türkiye’nin sahip olduğu yüksek jeotermal enerji potansiyelini ortaya koymaktadır (Şener vd., 2023). Jeotermal alanların yaklaşık %78’inin Ege Bölgesi’nde yoğunlaştığı, geri kalan potansiyelin ise İç Anadolu (%9), Marmara (%7) ve Doğu Anadolu (%5) bölgelerine dağıldığı tespit edilmiştir (ETKB, 2024).

Jeotermal kaynaklar, sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşimlerine bağlı olarak farklı kullanım alanlarına sahiptir. Türkiye’deki sahaların yaklaşık %84’ü düşük ve orta entalpili jeotermal sistemlerden oluşmakta olup, bu kaynaklar konut ve sera ısıtması, termal turizm ve endüstriyel prosesler gibi doğrudan kullanım uygulamalarında değerlendirilmektedir. Geri kalan %16’lık kısmı ise elektrik enerjisi üretimine elverişli yüksek entalpili jeotermal sistemler kapsamında yer almaktadır (Şener vd., 2023).

Türkiye’nin jeotermal enerjiye dayalı kurulu gücü Mayıs 2026 itibarıyla 1.798 MW seviyesine ulaşmış ve 125.481 MW olan toplam elektrik kurulu gücü içerisinde yaklaşık %1,43’lük bir paya sahip olmuştur (EPIAŞ, 2026). İlgili ayda gerçekleştirilen 905.173 MWh jeotermal elektrik üretimi ise ülkenin toplam elektrik üretiminin %3,37’sini oluşturmaktadır. Bu gelişim süreci tarihsel perspektiften incelendiğinde, 2005 yılında yalnızca 20 MW olan söz konusu kapasitenin günümüze kadar yaklaşık 90 kat artış gösterdiği saptanmaktadır. Yüzey sıcaklığı ≥ 30 °C olan 460 jeotermal alandan 27’si elektrik üretimine yönelik olarak işletilmektedir (Mertoğlu vd., 2021; Gutiérrez-Negrín, 2024). Bu kapasitesiyle Türkiye, dolaylı kullanımda küresel ölçekte

dördüncü, Avrupa’da ise birinci sırada, doğrudan kullanım alanında ise dünyada beşinci, Avrupa’da üçüncü konumdadır. 2024 yılı itibarıyla 13 ilde 25 jeotermal alandan 170.481 konut eşdeğeri alan merkezi ısıtma ile karşılanmakta, 27 ilde 62 sahada toplam 6.970.158 m² sera alanı jeotermal enerjiyle ısıtılmaktadır (Çelmen vd., 2025).

Biga Yarımadası’nın en önemli morfolojik yükseltisi olan Kaz Dağı (Karataş Tepesi, 1.774 m), yıllık ortalama 1.000 mm’yi aşan yağış miktarı ile yer altı suyu rezervlerinin beslenmesinde rol oynamaktadır. Bu hidrolojik beslenim, suların derin dolaşımını destekleyerek jeotermal akışkanların oluşumu ve yüzeye taşınmasını kolaylaştırmaktadır (Yalçın, 2007). Bölgedeki başlıca tektonik hatlar ve jeotermal çıkışlar genel olarak KD-GB doğrultuludur. Çanakkale il sınırları içerisinde, yüzey sıcaklıkları 23-96,2 °C arasında değişen 14 jeotermal alan tanımlanmıştır (Şanlıyüksel Yücel vd., 2013). İldeki en yüksek sıcaklık, Tuzla jeotermal alanında 814 m derinlikteki kuyuda 174 °C olarak ölçülmüştür (Akkuş vd., 2005). Bu sahada, toplam kurulu gücü 30,45 MW olan dört adet jeotermal enerji santrali aktif olarak işletilmektedir (EPDK, 2026).

Söz konusu 14 alandan dördünün yer aldığı Çan ilçesi, jeotermal kaynakları, linyit rezervleri, endüstriyel hammadde yatakları ve yüksek metalik cevherleşme potansiyeliyle Biga Yarımadası’nın jeolojik mirasını yansıtmaktadır. Bu özellikler nedeniyle bölge, Türkiye’nin jeoekonomik açıdan önem taşıyan alanlar arasında yer almaktadır. Bu çalışma; saha gözlemleri, hidrojeokimyasal analizler, güncel kurumsal veriler ve literatür bulguları ışığında Çan ve yakın çevresinin jeotermal enerji ile madencilik potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Çalışmanın temel amacı, jeolojik unsurlar ile enerji, endüstriyel hammadde ve metalik maden potansiyeli arasındaki çok yönlü ilişkileri; çevresel risk yönetimi, döngüsel ekonomi, kaynak verimliliği, teknolojik

entegrasyon ve bölgesel kalkınma boyutlarıyla sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifinden ele almaktır. Ayrıca çalışma, ilçenin doğal kaynak potansiyelini su-enerji-maden bütünlüğü ekseninde değerlendirerek, çevresel iyileştirmeyi önceliklendiren ve ekonomik çıktılarla desteklenen uygulanabilir öneriler sunmaktadır.

Çan ve Çevresinin Coğrafi Özellikleri

Çan ilçesi, Çanakkale il merkezinin yaklaşık 70 km güneydoğusunda, Biga Yarımadası'nın coğrafi merkezinde yer almaktadır. Antik dönemde Granikos olarak adlandırılan Kocabaş Çayı'nın hidrolojik havzası içerisinde bulunan ilçe hem bir geçiş koridoru olması hem de zengin doğal kaynakları nedeniyle köklü bir yerleşim tarihine sahiptir. Bölgedeki arkeolojik bulgular, Orta Paleolitik döneme tarihlendirilen yontma taş aletlerle belgelenmiş olup Çan'ın, Biga Yarımadası'nda ilk insan izlerinin en yoğun saptandığı alanlardan biri olduğunu ortaya koymaktadır (Özer vd., 2018; Atabay ve Körpe, 2019).

Yaklaşık 88.700 hektarlık yüzölçümüne sahip olan ve idari olarak bir belde ile 65 köyü barındıran ilçe, morfolojik açıdan çevresi dağlık kütlelerle kuşatılmış tipik bir havza (çanak) yapısı sergilemektedir. İlçenin en belirgin topoğrafik yükseltisi güneybatıda yer alan Ağı Dağı'dır (983 m). Tarımsal faaliyetlerin yoğunlaştığı Karakoca, Bahadırılı ve Helvacı ovaları ise bölgenin başlıca düzlük alanlarını oluşturmaktadır. Kocabaş Çayı, 84 km uzunluğu ile Çanakkale ilinin en uzun ikinci akarsuyudur ve maksimum taşkın debisi 1.345 m³/sn olarak kaydedilmiştir (ÇÇŞİDİM, 2025). Kaynağını Ağı Dağı'nın yükseklerinden (Kaynarca) alan bu akarsu, Çan ve Biga ilçelerinin verimli tarım alanlarını kat ederek Karabiga üzerinden Marmara Denizi'ne dökülmektedir. Akarsu ağının aşındırma faaliyetleri, bölgenin heterojen jeolojik yapısıyla birlikte karakteristik vadi morfolojilerinin gelişiminde belirleyici rol oynamıştır.

Çan ve çevresinde, Akdeniz ve Karadeniz iklimleri arasında geçiş özelliği gösteren bir iklim tipi hâkimdir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1929-2025 arasındaki verilerine göre bölgede yıllık ortalama sıcaklık 15,2 °C, yıllık toplam yağış miktarı ise yaklaşık 620,7 mm'dir (MGM, 2026). Akarsular, mevsimsel yağışlar ve kar erimelerine bağlı olarak düzensiz bir rejim göstermektedir. Bu düzensizliği yönetmek, taşkın riskini azaltmak ve su temini sağlamak amacıyla bölgede Karakoca, Altıkulaç ve Karlı barajları ile Küçüklü ve Koyunyeri başta olmak üzere çok sayıda gölet inşa edilmiştir (DSİ, 2026).

Bu fiziki ve iklimsel çerçeve içinde gelişen ilçenin sosyo-ekonomik yapısı; linyit, metalik maden ve endüstriyel hammadde rezervleri, gelişmiş seramik endüstrisi, enerji üretim faaliyetleri ve yoğun tarımsal üretimin karşılıklı etkileşimiyle şekillenmiştir. Bu çok bileşenli üretim modelinin sürdürülebilirliği ise özellikle yüzeysel su kaynaklarının yetersiz kaldığı dönemlerde kritik önem taşıyan yer altı suyu rezervlerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu bağlamda, bölgedeki endüstriyel ve madencilik faaliyetleri ile yerel yerleşimler için önemli bir kaynak olan Kocabaş Çayı havzasındaki alüvyon akifer üzerindeki antropojenik kullanım baskısı, yer altı suyu seviyesi ve kalitesi ile söz konusu faaliyetler arasındaki hidrojeokimyasal etkileşimin ayrıntılı biçimde analiz edilmesini gerekli kılmaktadır.

ÇAN ve ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Stratigrafi ve Litolojik Birimler

Biga Yarımadası'ndaki Tersiyer öncesi temel kayalar, farklı stratigrafik istifler sunan ve birbirleriyle tektonik ilişkili KD-GB uzanımlı zonlar boyunca yüzlek vermektedir. Bu zonlar doğudan batıya doğru sırasıyla İzmir-Ankara zonu, Sakarya zonu, Çetmi melanji ve Ezine zonu olarak adlandırılmıştır (Duru vd., 2012). Biga Yarımadası'ndan Doğu Pontidler'e kadar

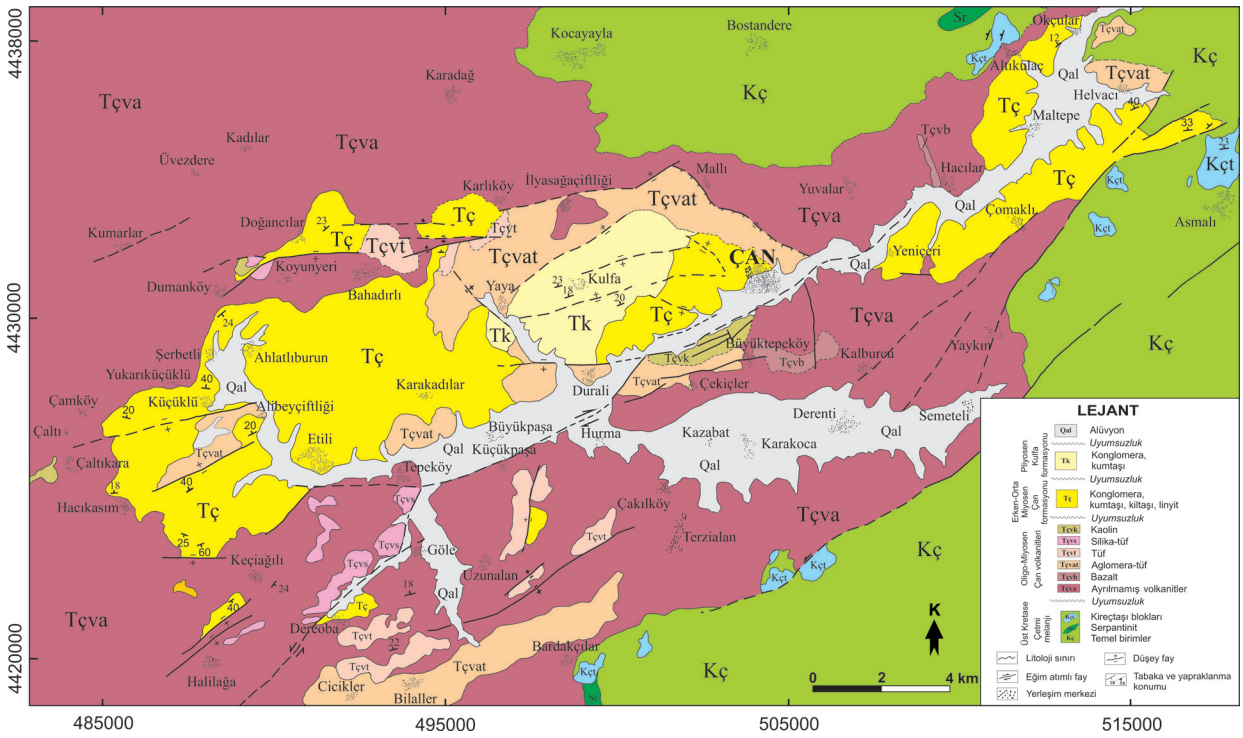
uzanan Sakarya zonu Şengör ve Yılmaz (1981) tarafından tanımlanmıştır. Bu zonda, temelde Paleozoyik yaşlı Kazdağ metamorfikleri (Bingöl, 1969), bunlarla tektonik dokanaklı, muhtemel yaşı Triyas öncesi olan düşük dereceli metamorfizma geçirmiş metasedimanter kayaçlardan oluşan Kalabak formasyonu (Krushensky vd., 1980) ve en üstte, alttaki birimlerle çoğunlukla tektonik dokanaklı, yer yer uyumsuz konumlu Permien-Orta Triyas yaşlı Karakaya kompleksi (Bingöl vd., 1973; Şengör vd., 1985) bulunmaktadır. Tüm bu birimler Geç Triyas-Erken Kretase yaşlı birimler tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Duru vd., 2012).

Sakarya zonunun temelinde yer alan bu birimlerden en altta bulunan Kazdağ metamorfikleri, çekirdeğinde meta-ultramafik kayaçlar ile metagabroların yer aldığı, bunu çevreleyen mermer ağırlıklı bir seri ve en üstte mermer ile amfibolit arakatlı felsik gneyslara geçiş gösteren birimlerden oluşmaktadır; bu kütle, Kazdağ masifinin yapısal kubbesini temsil etmektedir (Okay ve Satır, 2000). Kazdağ metamorfiklerinin yapısal kalınlığı 10 km'nin üzerindedir (Okay vd., 1990). Kazdağ metamorfizmasının yaşı literatürde tartışmalıdır; jeokronolojik çalışmalar Orta Karbonifer'den (308 ± 16 My; Okay vd., 1996) en Geç Oligosen'e (~ 24 My; Okay ve Satır, 2000) kadar geniş bir aralıkta değişmektedir. Duru vd. (2012), Kazdağ metamorfiklerinin Orta Karbonifer ($317,6 \pm 2,9$ My) ve Erken Triyas'ta ($246,9 \pm 4,7$ My) olmak üzere iki farklı yüksek dereceli metamorfizma evresi geçirdiğini ve bu metamorfik birimlerin bugünkü konumlarına tektonik olarak yerleşmesinin (istiflenmesinin) Erken Triyas'ta veya daha sonra gerçekleştiğini ifade etmiştir.

Kazdağ metamorfikleri üzerinde tektonik dokanakla yer alan birim; Karbonifer-Permien yaşlı ekzotik kireçtaşı blokları içeren, hafif metamorfizma geçirmiş Triyas yaşlı feldispatlı kumtaşı, metakumtaşı, şeyl, kuvarsit, radyolarit, çamurtaşı, konglomera ve bazik volkanitlerden oluşmaktadır. Bingöl vd. (1973) tarafından

Karakaya formasyonu olarak tanımlanan birim, Şengör vd. (1985) tarafından, içerisindeki farklı alt birimlerin birbirinden farklı havza ve/veya ortam özellikleri göstermesi nedeniyle Karakaya kompleksi olarak adlandırılmıştır. Düzenli bir istif göstermeyen birim içerisindeki litolojiler, birbirleriyle düşey ve yanal yönde geçişli veya blok konumunda yer almaktadır (Duru vd., 2012). Karmaşık ve yoğun tektonik deformasyon geçirmesi nedeniyle yer yer melanj yapıları oluşan Karakaya kompleksi, benzer yaşta fakat değişik havza koşulları ve tektonik ortamları yansıtan farklı tektonostratigrafik birimlerden meydana gelmektedir (Okay vd., 1990). Bölgesel ölçekte ise Karakaya kompleksiyle eşdeğer nitelikte Orta-Geç Triyas yaşlı bir dalma-batma-eklenme kompleksinin, Kuzey Anadolu'da Ege Denizi'nden İran'a kadar batı-doğu yönünde yaklaşık 1.100 km boyunca yüzeyletiği belirtilmektedir (Pickett ve Robertson, 2004).

Kazdağ metamorfikleri ve Karakaya kompleksini tektonik olarak örten, Üst Kretase yaşlı karmaşık birim, ilk kez Okay vd. (1990) tarafından Çetmi ofiyolitli melanji olarak adlandırılmış, sonraki çalışmalarda ise Çetmi melanji olarak kullanılmıştır (Duru vd., 2012; Şekil 2). Çetmi melanji, farklı kökendeki kayaçların tektonik dilimler veya olistolitler şeklinde bir arada bulunduğu karmaşık bir topluluktur. Birim başlıca grovak, fillat, mikaşist, eklojit, serpantin, spilitik bazalt, radyolarit ve kireçtaşı-mermerden oluşmaktadır (Duru vd., 2012). Bu bileşenler içinde spilitik mafik volkanik kayaçlar, kireçtaşı ve grovak-şeyl hacimsel olarak baskındır; eklojit ve eklojitik mikaşist büyük tektonik dilimler halinde, radyolaryalı çört ve serpantin ise az miktarda yer almaktadır (Okay ve Satır, 2000). Melanj, doğu sınırında Sakarya zonu kayaçlarıyla eğim atımlı normal faylı bir dokanak oluşturmaktadır (Duru vd., 2012). Kaz Dağı'nda Çetmi melanjinin düşey kalınlığının 1.500 m'yi aşmadığı saptanmıştır (Okay ve Satır, 2000).



Şekil 2. Çan ve çevresinin jeoloji haritası (Bozcu vd., 2008; Gürdal, 2011).

Figure 2. Geological map of Çan and its surroundings (Bozcu et al., 2008; Gürdal, 2011).

Çan'ın güneybatısında, Bardakçılar jeotermal alanı çevresinde yüzlek veren ve Çetmi melanjını keserek yerleşen plütonik kayalar, Evciler plütünü olarak tanımlanmıştır (Öngen, 1978; Birkle ve Satır, 1995). BGB-DKD uzanımlı plüton, yaklaşık 180 km²'lik bir alanı kapsayan eliptik bir geometri sergilemektedir (Genç, 1998). I-tipi, metalümin ve yüksek potasyumlu kalk-alkali karakterli olan bu kütle, geç Oligosen döneminde kabuğun sığ derinliklerine yerleşmiştir (Özdamar vd., 2021). Litosferik manto kökenli magmalardan türeyen plüton, çevresindeki metamorfik ve volkanik yan kayalar içerisine sokulmuştur (Özdamar, 2018). Bünyesinde çok sayıda aplitik dayk ve damarların yanı sıra, uzamış veya küresel şekilli mafik mikrogranüler enklavlar yaygın olarak gözlenmektedir (Genç, 1998; Özdamar vd., 2021). Mineralojik ve jeokimyasal özelliklerine göre plüton üç ana fasiyese ayrılmaktadır: Çavuşlu

monzodiyoriti, Karaköy granodiyoriti ve Evciler kuvars diyorit-granodiyoriti (Öngen, 1992; Yücel Öztürk vd., 2005). Evciler plütununun yaşı, konvansiyonel K-Ar yöntemiyle $26,4 \pm 0,6$ - $31,1 \pm 1,4$ My (biotit) ve $36,0 \pm 1,4$ My (klorit) (Delaloye ve Bingöl, 2000), biyotit üzerinde yapılan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analiziyle $24,8 \pm 0,1$ My (Altunkaynak vd., 2012) ve hornblend üzerinde gerçekleştirilen $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analizleriyle $25,45$ - $28,32$ My (Özdamar vd., 2021) olarak belirlenmiştir.

Bölgede geniş alanlarda ve Karalıca jeotermal alanı çevresinde yüzlek veren andezit, dasit, riyodasit bileşimli lav, tuf ve aglomeralardan oluşan Çan volkanitleri (Ercan vd., 1995) kendisinden yaşlı birimleri uyumsuzlukla üzerlemektedir. Gökçeada'daki yüzleklerinden elde edilen andezitik lavlarda K/Ar analizleriyle saptanan $30,4 \pm 0,7$ ve $34,3 \pm 1,2$ My yaşları, volkanizmanın erken evrelerini temsil etmektedir.

(Ercan vd., 1995). Genç vd. (2012) ise aynı birime ait andezit örneklerinden $26,5 \pm 1,1$ My K/Ar yaşı elde ederek, volkanizmanın etkinliğinin Geç Oligosen'den Erken Miyosen'e kadar devam ettiğini belirtmiştir.

Çan volkanitleri, dokanak ilişkileri ve litolojik özellikleri dikkate alınarak beş litostratigrafik birime ayrılmıştır. Bu birimler andezit lavlar, andezitik tüfler, trakiandezitik ve dasitik bileşimli lavlar, andezitik-dasitik bileşimli aglomeralar ve bunların alterasyon ürünlerinden oluşmaktadır. Bu volkanitler yaygın olarak hidrotermal alterasyona uğramış olup, kloritleşme, killeşme ve silisleşme şeklinde gelişen bu süreç bölge açısından ekonomik önem de taşımaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Ercan vd. (1995), bölgedeki metalik maden yataklarının büyük ölçüde bu volkanizma ile ilişkili olduğunu, ayrıca tüflerdeki alterasyonun ekonomik kaolin yataklarının gelişimine yol açtığını belirtmiştir.

Oligosen boyunca bölgede etkin olan karasal volkanizmanın zayıflamasıyla birlikte çöküntü alanlarında gölsel ortamlar gelişmiş ve Çan formasyonu bu volkanik kayalar uyumsuz olarak üzerlemiştir (Gürdal, 2011). İlk kez Hezarfen (1976) tarafından tanımlanan birim, konglomera, kumtaşı, kilaşı, linyit ve volkanoklastiklerden oluşan heterojen bir istif sunmaktadır. Ediger (1988), Çan formasyonu linyitleri üzerinde gerçekleştirdiği palinolojik incelemeler sonucunda bu birimin Erken-Orta Miyosen yaşlı olduğunu ortaya koymuştur. Fay denetimli, birbirinden bağımsız ve izole gölsel havzalarda gelişim gösteren birim (Siyako vd., 1989), 60-270 m arasında değişen bir kalınlık sunmakta olup, yanal ve düşey yönde ani kalınlık değişimleri sergilemektedir (Bozcu vd., 2008). Bu durum, havzanın aktif bir tektonik rejim altında geliştiğini ve sedimantasyonun genellikle KD-GB doğrultulu fay sistemleri tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Siyako vd., 1989; Bozcu vd., 2008). Arazi çalışmaları sırasında, Etili'nin güneybatısında yer alan açık kömür ocaklarında

yüzlek veren kilaşları ve tüftler içerisinde yaprak fosillerine rastlanmıştır. Bölgesel ölçekte ekonomik açıdan önem taşıyan bu formasyonun tip kesit yeri, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) Çan Linyitleri İşletmesi (ÇLİ) sahasında yer almaktadır.

Pliyosen yaşlı Kulfa formasyonu, flüvyal yelpaze çökelleri niteliğinde olup gri ve bej renkli, kötü boylanmalı konglomera ve kumtaşı araldanmasından oluşmaktadır (Balkış ve Yazıcı, 1996). Bu birim, Çan formasyonunu uyumsuz olarak örtmektedir. Konglomeralar, çoğunlukla bazalt, andezit, dasit ve sileks bileşimli volkanik kayalardan türemiş çakıllar içermektedir.

Kocabaş Çayı ve kolları çevresinde yaygın olarak gözlenen Kuvaterner yaşlı alüvyon tutturulmamış çakıl, kum, kil ve silt boyutundaki malzemelerden oluşmakta ve tüm birimleri uyumsuzlukla örtmektedir.

Tektonik Yapı ve Fay Sistemleri

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolu, Çanakkale il sınırları içerisinde KD'dan GB'ya doğru sırasıyla Sinekçi, Çan-Biga, Sarıköy, Bekten, Yenice-Gönen, Evciler ve Edremit fayları ile temsil edilmektedir (Kürçer vd., 2019). Bölgedeki ana fay segmentleri genel olarak KD-GB doğrultulu bir uzanım sergilemektedir. Güney Marmara Bölgesi'ndeki en aktif sismotektonik yapılardan biri, sağ yanal doğrultu atımlı Yenice-Gönen fayıdır (Ketin ve Roesli, 1953). Bu fay, 18 Mart 1953 tarihinde $M_s = 7,2$ büyüklüğünde yıkıcı bir deprem üretmiş, 263 kişinin yaşamını yitirmesine neden olmuş ve bu sarsıntıya bağlı olarak yaklaşık 70 km uzunluğunda bir yüzey kırığı gelişmiştir (Ketin ve Roesli, 1953; Kürçer vd., 2019).

Şaroğlu vd. (1987) tarafından tanımlanan Çan-Biga Fay Zonu (ÇBFZ), Çan ve Biga ilçe merkezleri arasında uzanmaktadır (Şekil 1). Sağ yanal doğrultu atımlı bu zon, Kocabaş Çayı

vadisini izlemekte olup, çayın yatak morfolojisi büyük ölçüde bu tektonik yapı tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca bu vadi boyunca fay zonu üzerinde jeotermal kaynakların geliştiği bilinmekte olup, Çan jeotermal alanı da bu tektonik hat üzerinde yer almaktadır (Emre vd., 2012). Emre vd. (2012) tarafından, uzunluğu 40 km'yi aşan doğrultu atımlı faylar büyüklüğü $M \geq 7$ deprem üretme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Yaklaşık 41 km uzunluğundaki ÇBFZ, bu kriter doğrultusunda yüzey yırtılmasına neden olabilecek yıkıcı büyüklükte deprem üretebilen yapılar arasında yer almaktadır.

Bölgenin tarihsel sismisitesi incelendiğinde, 6 Mart 1737 tarihinde Biga'da $M_s = 7$ büyüklüğünde bir deprem meydana geldiği bilinmektedir (Ambraseys ve Jackson, 2000). Aletsel dönemde ise 5 Temmuz 1983 tarihinde Biga ilçesinde gerçekleşen $M_s = 6,1$ büyüklüğündeki depremde 3 kişi yaşamını yitirmiş ve 85 binada hasar meydana gelmiştir (KRDAE, 2026a). Yakın geçmişte, 3 Mayıs 2018 tarihinde Tepeköy-Çan merkezli $M_w = 4,2$ büyüklüğünde ve yaklaşık 7 km odak derinliğine sahip bir deprem kaydedilmiştir (KRDAE, 2026b).

Arazi çalışmaları sırasında, Çan ve çevresindeki tektonik aktiviteye bağlı olarak kayalar da çok sayıda çatlak ve süreksizlik düzlemi saptanmıştır. Bölgedeki yoğun bitki örtüsü ve yaygın alterasyon zonları, fay sürekliliklerinin arazide doğrudan izlenmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, erozyona karşı dirençli sileks tepeleri ile jeotermal çıkışlar, fay doğrultularının belirlenmesinde başlıca hidrojeolojik ve morfolojik göstergeler niteliği taşımaktadır. Çan ve çevresindeki fay zonları, hâkim sağ yanal doğrultu atımlı karaktere ek olarak, uzunlukları 10 km'yi aşmayan normal bileşenli fay parçaları da içermektedir (Emre vd., 2012). Bu yapısal çeşitliliğin, bölgedeki jeotermal sistemlerin dolaşım yollarını ve hidrotermal alterasyon zonlarının dağılımını denetleyen bir unsur olduğu değerlendirilmektedir.

MATERYAL ve METOT

Çan ve yakın çevresinde 2005 yılından bu yana düzenli olarak sürdürülen saha çalışmaları, 2024 yılı Mart ayında jeotermal kaynaklarda ve 2025 yılı Şubat-Haziran ayları arasında maden ocakları ve işletmelerinde gerçekleştirilen teknik incelemelerle güncellenmiş ve kapsamı genişletilmiştir. Ayrıca, araştırma kapsamında 2025 yılı Şubat ayında Çanakkale İl Özel İdaresi ile Çanakkale Sosyal Güvenlik İl Müdürlüğüne resmi yazı ile başvuruda bulunulmuş ve kurum yetkilileriyle görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Çan ilçesindeki jeotermal ve maden sahalarına ilişkin güncel teknik veriler ile madencilik sektöründe istihdam edilen personele ait güncel veriler temin edilmiş ve çalışmada kullanılmıştır.

Hidrojeokimyasal saha çalışmaları sırasında, Çan ilçesindeki tüm jeotermal kaynakların fizikokimyasal parametreleri (sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik ve tuzluluk) yerinde WTW Multi 340i cihazı ile eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Problemlerin günlük kalibrasyonları, pH için tampon çözeltiler, elektriksel iletkenlik için ise standart iletkenlik çözeltileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeotermal kaynakların ve maden yataklarının konum ve yükseklik bilgileri ise Garmin GPSMAP 62s el tipi GPS yardımıyla saptanmıştır. Koordinatlar, World Geodetic System 1984 (WGS84) datumunda, Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 35N diliminde verilmiştir.

Hidrojeokimyasal analizler için numune alımı yalnızca Karailıca jeotermal kaynağından yapılmış, diğer sahalara ait veriler literatürden derlenmiştir. Numune almadan önce polietilen kaplar, kaynaktan alınan suyla üç kez çalkalanmış; numuneler ise içlerinde hava payı kalmayacak şekilde 0,45 µm gözenek çaplı membran filtrelerden geçirilerek doldurulmuştur. Majör katyon, minör ve iz element analizleri için 500 ml'lik kaplara alınan numuneler, katyonların

ve iz elementlerin çökmesini ve kap çeperine adsorpsiyonunu önlemek amacıyla nitrik asit (HNO_3) ile $\text{pH} < 2$ olacak şekilde asitlendirilmiştir. Anyon analizleri için 500 ml'lik, Si tayini için ise 50 ml'lik ayrı kaplara asit ilavesi yapılmadan numune alınmıştır. Hazırlanan numuneler etiketlenerek laboratuvar analizleri tamamlanana kadar $+4^\circ\text{C}$ 'de saklanmıştır.

Hidrojeokimyasal analizler, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Si ve B konsantrasyonları, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF) kapsamındaki SM 3120 B yöntemi kullanılarak indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) cihazıyla analiz edilmiştir. Bu aşamada katyon ve B analizleri asitlendirilmiş numunelerden, Si tayini ise asitsiz numunelerden yapılmıştır.

As, Fe, Mn ve Li konsantrasyonları, asitlendirilmiş numuneler kullanılarak derişim miktarına bağlı olarak iki farklı yöntemle belirlenmiştir: 0,1 ppm'in altındaki değerler SM 3125 B yöntemiyle indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) cihazında, 0,1 ppm'in üzerindeki değerler ise SM 3120 B yöntemiyle ICP-OES cihazında ölçülmüştür.

Anyon tayinlerinde ise asitsiz numuneler kullanılmıştır. HCO_3^- konsantrasyonu volumetrik analiz yöntemiyle belirlenirken, Cl^- ve SO_4^{2-} konsantrasyonları aynı standart kapsamındaki SM 4110 B yöntemi kullanılarak iyon kromatografisi (IC) cihazıyla analiz edilmiştir.

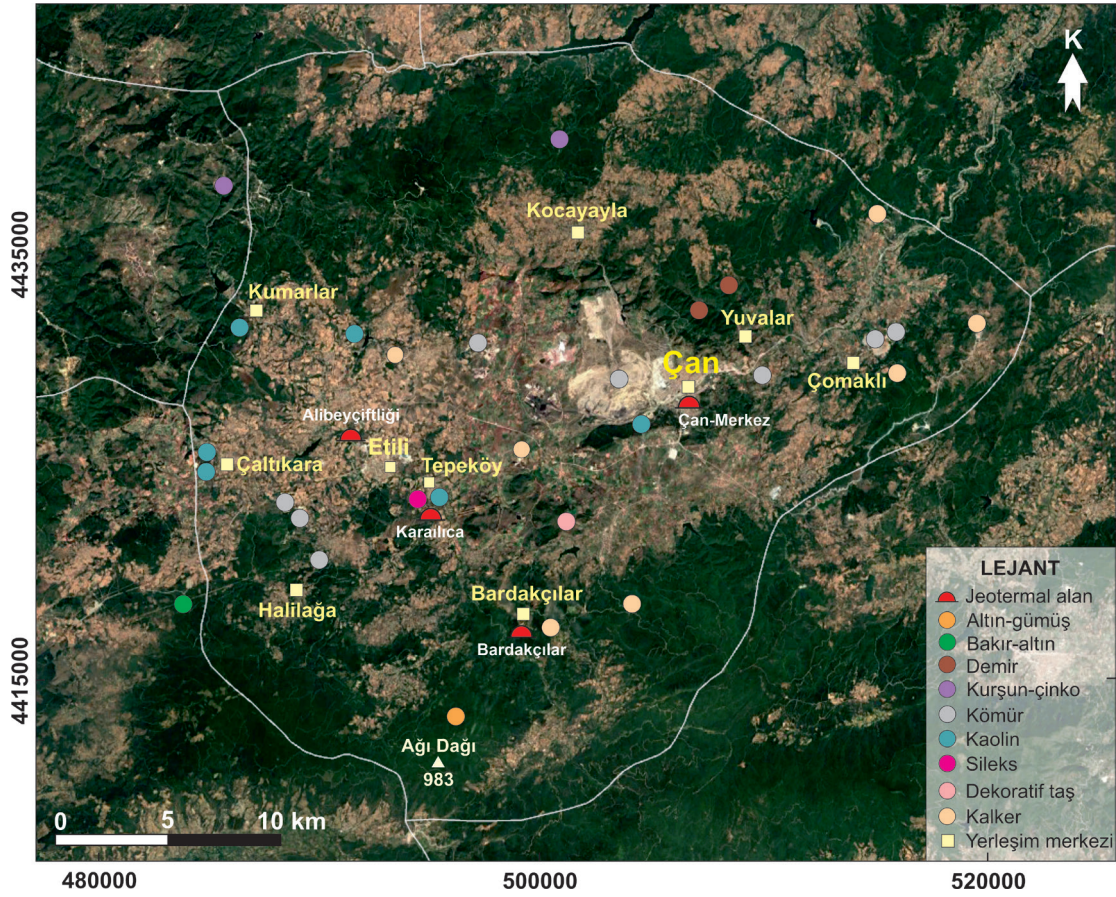
Elde edilen hidrojeokimyasal veriler, literatür verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Jeotermal kaynakların fasiyeslerinin belirlenmesinde ve hidrojeokimyasal süreçlerin yorumlanmasında Piper (1944) ve Schoeller (1962) diyagramlarından yararlanılmıştır.

Jeotermometre hesaplamalarının güvenilirliğini test etmek amacıyla ise Giggenbach (1988) Na-K-Mg üçgen diyagramından yararlanılmıştır. Tüm bu diyagramlar AquaChem yazılımı ile oluşturulmuştur. Farklı kaynaklardan derlenen verilerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla her veri seti için iyonik denge hatası ($\text{CBE} = 100 \times (\Sigma\text{Katyon} - \Sigma\text{Anyon})/(\Sigma\text{Katyon} + \Sigma\text{Anyon})$, meq/l) hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen haritalar ise ArcGIS yazılımı ile hazırlanmıştır. Şekil 1'de dijital yükseklik modelinden türetilen gölgelendirilmiş rölyef altlığı kullanılmış, bu altlık üzerine MTA diri fay veri tabanından elde edilen fay hatları çizgisel katman olarak işlenmiş, ilçe sınırları ve merkezleri ayrı katmanlar halinde haritaya eklenmiştir. Şekil 3'te ise altlık olarak Google Earth uydu görüntüsünden yararlanılmıştır. Tüm haritalarda koordinat referans sistemi olarak UTM Zone 35N (WGS84) datumu kullanılmış, haritalar kuzey oku, ölçek çubuğu, koordinat karelağı ve lejant eklenerek kartografik standartlara uygun hâle getirilmiştir.

ÇAN ve ÇEVRESİNDEKİ JEOTERMAL KAYNAKLAR

Çan ilçesinde bulunan jeotermal alanlar; Alibeyçiftliği, Bardakçılar, Çan-Merkez ve Karalıda saharıdır (Şekil 3). Atabay ve Körpe (2019), Paleolitik Çağ'da buzullaşma koşullarının hâkim olduğu soğuk iklim evrelerinde, jeotermal kaynakların sağladığı birkaç derecelik sıcaklık farkının yarattığı mikroklimatik etkinin Çan ve çevresini erken insan toplulukları için potansiyel bir sığınak alanı hâline getirmiş olabileceğini ileri sürmüştür. Bu jeotermal mirasın günümüzdeki yansıması, Çan-Merkez, Bardakçılar ve Karalıda jeotermal alanlarında yıl boyu hizmet veren termal tesisler aracılığıyla sürdürülen termal ve sağlık turizmidir.



Şekil 3. Çan ve çevresindeki jeotermal alanların ve maden yataklarının konumu.

Figure 3. Spatial distribution of geothermal fields and mineral deposits in the Çan district and its vicinity.

Jeotermal Kaynakların Fizikokimyasal ve Hidrojeolojik Özellikleri

Çan ilçesindeki jeotermal kaynaklara ait önceki çalışmalardan derlenen veriler, bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerle birlikte değerlendirilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, suların farklı yıllara ait fizikokimyasal karakterizasyonu Çizelge 1’de sunulmuştur.

Alibeyçiftliği jeotermal alanı, deniz seviyesinden 130 m yükseklikte ve Çan ilçe merkezine 14 km uzaklıkta yer almaktadır. Bölgedeki diğer kaynaklara kıyasla sınırlı debiye (0,5-1 l/sn) sahip olan jeotermal akışkan, geleneksel yöntemlerle inşa edilmiş basit havuzlarda toplanmakta, genellikle çevre

köylerdeki yerel halk tarafından kullanılmaktadır. Alanda açılmış herhangi bir sıcak su sondajı ya da tesis bulunmamaktadır. Kaynağın yüzey sıcaklığı 16,3-32 °C aralığında değişmektedir; pH değeri 7,14-7,5, EC değeri 1900-2510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve tuzluluğu ‰1,2 olarak ölçülmüştür (Çizelge 1). Jeotermal sistemde örtü kaya işlevini sedimanter kayalar üstlenirken, hazne kaya volkanik birimlerden oluşmaktadır. Beslenme mekanizması, yüzey sularının kayaç gözenekleri ve süreksizlik düzlemleri boyunca derine süzülmesi, jeotermal gradyanın etkisiyle ısınması ve ardından tektonik aktivitenin oluşturduğu kırık ve çatlak sistemleri boyunca yükselerek yüzeye ulaşmasına dayanmaktadır.

Çizelge 1. Çan ilçesindeki jeotermal kaynakların farklı yıllara ait fizikokimyasal karakterizasyonu.

Table 1. Physicochemical characterization of geothermal resources in the Çan district at different sampling periods.

Jeotermal kaynak	Referans	Koordinat (m)	Yükseklik (m)	Yüzey sıcaklığı (°C)	pH	EC (µS/cm)	Tuzluluk (‰)
Alibeyçiftliği	Sarp vd. (1998)	490326 / 4427035	130	32	7,4	1900	n.a.
	Yalçın (2007)			31,5	7,3	2130	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			16,3	7,5	2460	n.a.
	Karaca vd. (2013)			29,7	7,14	2510	1,2
	Bu çalışma (2024)			31	7,2	2500	1,2
Çan-Merkez	Çağlar (1948)	504410 / 4430391	80	46,5	6,8	n.a.	n.a.
	Kartal (1974)			40	7,7	2900	n.a.
	Sarp vd. (1998)			47	8,1	3300	n.a.
	Yalçın (2007)			48,5	6,9	1577	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			46,1	6,7	3002	n.a.
	Karaca vd. (2013)			43	7,89	2870	1,4
	Bu çalışma (2024)			38,1	6,92	3140	1,4
Karailıca	Çağlar (1948)	493897 / 4424572	120	48,7	6,5	n.a.	n.a.
	Sarp vd. (1998)			50	7,5	2500	n.a.
	Kahraman vd. (2005)			48,4	7	2230	n.a.
	Yalçın (2007)			50,2	6,8	1349	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			49	6,7	2470	n.a.
	Karaca vd. (2013)			47,9	6,84	2500	1,2
	Bu çalışma (2024)			48,4	6,56	2530	1,2
Bardakçılar	Çağlar (1948)	497877 / 4418474	180	65	n.a.	n.a.	n.a.
	Sarp vd. (1998)			59	7,9	1600	n.a.
	Yalçın (2007)			58,9	7,1	951	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			52,9	8,1	1593	n.a.
	Karaca vd. (2013)			58,5	8,08	1708	0,7
	Bülbül vd. (2022)			59	8	1605	n.a.
	Bu çalışma (2024)			58,4	7,85	1630	0,7

n.a.: veri mevcut değil / not available

Kaynak çevresindeki olası fayların yanal sürekliliği sınırlıdır; alana en yakın önemli yapısal unsur, yaklaşık 2 km güneyde yer alan ÇBFZ'dir (Deniz, 2010).

Çan-Merkez jeotermal alanı, deniz seviyesinden 80 m yükseklikte yer almaktadır. Çağlar (1948) tarafından yapılan ölçümlerde Çan-Merkez jeotermal kaynağının sıcaklığı 46,5 °C, debisi ise 1,7 l/sn olarak kaydedilmiştir. 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında kaynağın debisi

tamamen kesilmiş, bir süre sonra yeniden akmaya başlasa da debisinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir (Müller, 1955). Bu durum, büyük depremlerin fay zonları boyunca gelişmiş akışkan dolaşım yollarını yeniden düzenleyerek jeotermal sistemlerin hidrodinamik özelliklerinde, özellikle debide kalıcı değişimlere yol açabileceğine işaret etmektedir. Nitekim 1990 yılında yapılan ölçümlerde kaynağın sıcaklığı 47 °C ile neredeyse sabit kalırken, debisi 0,3 l/sn'ye düşmüş ve 1948

değerine kıyasla yaklaşık 5,7 kat azalmıştır (Öktü vd., 1991).

1991 yılında, kaynağın debisini artırmak amacıyla 300 m (Çan-1) ve 100 m (Çan-2) derinlikli iki sıcak su sondajı açılmıştır (Öktü vd., 1991). Çan-1 sondajında kesilen litolojik birimler sırasıyla; 0-22 m aralığında çakıl-kum-kil araldanmalı alüvyon, 22-35 m aralığında Neojen yaşlı sedimanter kayaçlar, 35-88 m aralığında volkanik kayaçlar ve 88-300 m aralığında ise epimetamorfik kayaçlardır. Çan-2 sondajında ise benzer bir litolojik sıralama izlenmiş olup, sırasıyla 0-25 m alüvyon, 25-30 m Neojen yaşlı çökeller, 30-73 m volkanitler ve 73-100 m epimetamorfik kayaçlar kesilmiştir. Çan-1 kuyusunda yapılan kompresör testinde akışkan sıcaklığı 43 °C, debisi ise 0,6 l/sn olarak ölçülmüş, doğal kaynağa kıyasla debide iki kat artış sağlanırken sıcaklıkta düşüş gözlenmiştir. Kuyuda pompa kullanılıp kompresör seviyesi daha derine indirildiğinde debinin 1 l/sn'ye yükselebileceği öngörülmüştür. Çan-2 sondajında ise 28-36 °C aralığında değişen sıcaklıkta, ortalama 0,2 l/sn'ye kadar düşen düşük ve süreksiz bir verim elde edilmiştir (Öktü vd., 1991). İki kuyunun benzer litolojik istife sahip olmasına karşın belirgin farklı verim göstermesi, sahadaki volkanik birim içerisindeki ikincil geçirimsizlik ve alterasyon derecesinin kısa mesafelerde dahi değişkenlik gösterebileceğine işaret etmektedir. 2002 yılında açılan 144 m derinlikli ÇB-1 sondajı benzer bir litolojik istif kesmiş ve 48 °C sıcaklığında akışkan üretimine olanak sağlamıştır (Önder, 2002; Deniz, 2010).

Bu sondaj verileri ışığında, Çan ve çevresine düşen meteorik sular ile Kocabaş Çayı'na ait yüzey suları, bölgedeki yüksek birincil geçirimsizliğe sahip alüvyon akiferi beslemekte ve tektonik faaliyetler sonucu ikincil gözeneklilik ve geçirimsizlik kazanmış çatlaklı andezit, riyoit ve aglomera ile metamorfik kayaçlar boyunca derinlere süzölmektedir. Kuyu loglarında da izlendiği gibi, bu rezervuar kayaçları üzerinde örtü kaya işlevi gören birim Neojen yaşlı, kömür

parçacıklı çakıltası ağırlıklı, az tutturulmuş sedimanter kayaçlardan oluşmaktadır (Öktü vd., 1991; Sarp vd., 1998). Derin dolaşım sürecinde bölgesel jeotermal gradyan etkisiyle ısınan bu akışkan, Kocabaş Çayı yatağını sınırlayan ve yapısal kontrolü sağlayan ÇBFZ boyunca yükselmekte, yukarıda litolojileri verilen ve 100-300 m derinlik aralığında açılmış sondajlarla kesilerek Çan ilçe merkezindeki jeotermal kaynakları oluşturmaktadır (Deniz, 2010).

Bu sistemden beslenen Çan-Merkez jeotermal kaynağında ölçölen sıcaklık değerleri 38,1-48,5 °C arasında değişmekte olup, akışkan 6,7-8,1 pH aralığı ile nötr-hafif alkali karakterdedir. İlçe merkezinde termal otel ve spa merkezi bulunmaktadır. Bu çalışmada ölçölen en düşük sıcaklık değerinin doğrudan termal otel içinden alınmış olması, sondajdan çekilen jeotermal akışkanın iletim hatları boyunca yüzeye taşınırken kısmi bir ısı kaybına uğradığını düşöndörmektedir. Elektriksel iletkenlik değerleri 1577-3300 µS/cm ve tuzluluk ise %1,4 olarak ölçölmüştür.

Deniz (2010) tarafından jeotermal alanda incelenen 5 farklı sondajın loglarında, alüvyon kalınlığının 18-44 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Otel içi ölçömden kaynaklanan ısı kaybına ek olarak, bu durum özellikle alüvyonun daha kalın olduğu kesimlerde jeotermal akışkanın sıkı soğuk yer altı sularıyla karışma riskini artırarak ölçölen yüzey sıcaklıklarının düşük kalmasına katkıda bulunabilmektedir. Sahadaki bu hidrojeolojik kısıtlar, kaynağın kullanım alanlarını da sınırlamaktadır; nitekim bölgede planlanan Termal Konutlar projesinde jeotermal enerjiyle ısıtma hedeflenmiş, ancak yetersiz rezervuar sıcaklığı ve debinin sürekliliğine ilişkin belirsizlikler nedeniyle proje uygulama aşamasına geçirilememiştir.

Karailca jeotermal alanı, deniz seviyesinden 120 m yükseklikte, Çan ilçe merkezine yaklaşık 10 km uzaklıkta ve Tepeköy'ün 1 km güneyinde yer almaktadır. Çağlar (1948), Karailca jeotermal

alanında üç kaynak bulunduğunu ve bu kaynakların sıcaklık değerlerinin 39-48,7 °C arasında, toplam debisinin ise 8-10 l/sn olduğunu belirtmiştir. Müller (1955), 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında bu kaynakların debisinin yaklaşık %50 oranında azaldığını ifade etmiştir. Bu durum, Çan-Merkez'de gözlenen debi düşüşüyle birlikte, 1953 depreminin bölgedeki birden fazla jeotermal sistemi eş zamanlı etkilediğine işaret etmektedir.

Günümüzde Tepeköy Muhtarlığı tarafından işletilen termal tesis bünyesindeki üç jeotermal kaynak, sağlık turizmi ve tesisin ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır. Kaynakların kaptajının yapılmış olması nedeniyle net bir debi ölçümü yapılamamakla birlikte, bu değer 1-2 l/sn arasında olduğu tahmin edilmektedir. En yüksek sıcaklıklı kaynak, termal tesis içindeki kadınlar hamamındadır. Kaynağın yüzey sıcaklığı 47,9-50,2 °C, pH değeri 6,5-7,5, EC değeri 1349-2530 µS/cm ve tuzluluk oranı ise %0,2 olarak ölçülmüştür.

Sahanın en önemli rezervuar verisi, 2003 yılında termal tesisin yaklaşık 80 m güneybatısında 450 m derinlikte açılan Eti-1 kuyusundan gelmektedir. Kuyu kendiliğinden akış koşullarında 2,1 l/sn debide 59,2 °C, pompa testinde ise ortalama 8 l/sn debide 61,9 °C sıcaklıkta akışkan üretimi sağlamıştır (Kahraman vd., 2005). Kuyu litolojisi, yüzeyden itibaren sırasıyla 10 m'ye kadar toprak örtü, ardından 100 m'ye kadar altere andezitlerden oluşmaktadır. Bu birimi, 100-110 m derinlikte çatlaklı-kırıklı-altere karakterli bir sileks seviyesi izlemekte, 110 m'den itibaren kuyunun büyük kısmını oluşturan andezit-ignimbirit ardalanması başlamaktadır. Bu istif içinde, 385-410 m derinlik aralığında benzer karakterde ikinci bir sileks seviyesi tekrarlanmakta ve kuyu en altta ignimbiritik birimde (410-450 m) sonlanmaktadır. Theis yöntemiyle belirlenen hidrolik parametreler; transmisivite $3,87 \times 10^{-4}$ m²/sn, hidrolik iletkenlik $1,1 \times 10^{-6}$ m/sn ve depolama katsayısı $2,75 \times 10^{-5}$ olup düşük iletkenlik ve düşük depolama kapasitesiyle karakterize, basınçlı/

örtülü bir rezervuar davranışına işaret etmektedir. Kahraman vd. (2005), düşük hidrolik iletkenliği hem akışkanın geldiği seviyelerdeki ince taneli/killi ara katkılarla hem de bölgesel tektonizmanın ürünü olan ikincil kırık-çatlak geçirgenliğiyle ilişkilendirmiştir. Bu veriler, rezervuar davranışının litolojik ve yapısal etkenlerin birlikte etkisinden kaynaklandığını düşündürmektedir.

Çanakkale İl Özel İdaresi verilerine göre, Eti-1 kuyusunun güneybatısında 350 m derinlikte açılan Eti-2 kuyusunda akışkan sıcaklığı 46 °C ve debisi 0,6 l/sn olarak ölçülmüş, bu değerler Eti-1'e göre belirgin ölçüde düşüktür. Sahadaki bu yanal heterojenlik, Çan-Merkez'deki kuyularda gözlenen örüntüyle paralellik taşıyarak Çan ilçesi genelinde rezervuar verimliliğinin büyük ölçüde lokal yapısal/litolojik kontrole bağlı olduğunu düşündürmektedir. Bu yorumun doğrulanabilmesi için sahada ek jeofizik ve hidrojeolojik çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir.

Karalıda jeotermal sistemindeki ısı kaynağını, Oligosen'den Pliyosen'e kadar duraklamalı biçimde süregelen volkanik etkinlik ile bölgedeki genç plütonik sokulumlar oluşturmaktadır. Rezervuar kayacı oluşturan volkanik kayaçlar kısmen birincil gözenekliliğe sahip olmakla birlikte, asıl geçirimsizlik kazanımı bölgesel tektonizmanın ürünü olan ikincil çatlak sistemleri aracılığıyla gerçekleşmiştir. Örtü kaya işlevini üstlenen tüf ve lav seviyeleri sınırlı kalınlıkta olsa da jeotermal akışkanın kırık ve çatlaklarda mineral çökeltmesi, sistemin kendi örtüsünü kendiliğinden oluşturmaya yol açmıştır (Kahraman vd., 2005). Sahanın yapısal kontrolü incelendiğinde, Tepeköy güneyinde yaklaşık K45°D doğrultulu, 1 km atımlı, sağ yanal oblik bir fay bulunmaktadır. Karalıda jeotermal kaynakları ise bu ana faya dar açıyla yaklaşan, benzer nitelikte ancak nispeten daha genç ikincil bir fayın kontrolünde yüzeye ulaşmaktadır (Sarp vd., 1998).

Bardakçılar jeotermal alanı, deniz seviyesinden 180 m yükseklikte ve Bardakçılar köyünün 2 km güneybatısında konumlanmaktadır.

Jeotermal alanda toplam debisi 2-4 l/sn arasında üç kaynak bulunmaktadır. En yüksek sıcaklık değeri Çağlar (1948) tarafından 65 °C olarak ölçülmüştür. Jeotermal alandaki en yüksek sıcaklıklı kaynağın 1998 ile 2024 yılları arasındaki yüzey sıcaklığı 52,9-59 °C, pH değeri 7,1-8,1, EC değeri 951-1708 µS/cm ve tuzluluğu ‰0,7' dir.

2010 yılında Bardakçılar'daki termal tesisin güneyinde 750 m derinlikte açılan sondajda 67 °C sıcaklık ve 95 l/sn kompresör debisine sahip jeotermal akışkan elde edilmiştir (Bülbül vd., 2022). Bülbül vd. (2022), işletmeye geçilmeden önce kuyunun uzun süreli üretimde tutularak kuyu testlerinin tamamlanmasını önermekte olup, bu durum 95 l/sn'lik kompresör debisinin sürdürülebilir üretim kapasitesini değil, kuyu geliştirme aşamasındaki bir ön test sonucunu yansıttığını göstermektedir. Söz konusu kuyunun litolojisinde 0-5 m alüvyon, 5-62 m andezit, aglomera ve tüften oluşan volkanosedimanter birimler (dissemine kristalize pirit, kısmen kloritleşmiş biyotit, FeO boyamaları), 62-100 m gri-bej renkli, silisifiye, bol pirit saçınımlı rekristalize kireçtaşları, 100-750 m ise grimsi, siyah ve yeşil renkli, kuvars, feldispat ve dissemine pirit içeren, piroksen ve biyotitleri kısmen kloritleşmiş, ayrıca FeO etkisi, killeşme, kaolinleşme ve limonitleşme gösteren granodiyoritler izlenmektedir. Bu kuyu, Çan'daki jeotermal sahalar arasında en derin sondaj olup taşıdığı litolojik istif bölgenin düşey jeolojik yapısı açısından önemli veriler sunmaktadır.

Bülbül vd. (2022) bölgedeki en önemli aktif yapısal unsurlardan birinin Yenice-Gönen fayı ile ÇBFZ arasında KD-GB gidişli olarak uzanan, toplam 66 km uzunluğunda, yaklaşık K60°D doğrultulu, sağ yanal doğrultu atımlı Sarıköy fayı olduğunu belirtmiştir. Bu fay, Bardakçılar jeotermal alanına kadar uzanmaktadır. Sarıköy fayı, granodiyoritik birimde gelişen kırık-çatlak sistemleri aracılığıyla akışkan dolaşımını sağlayan akım yolu işlevi üstlenmekte, bu yapısal kontrol

sayesinde granodiyoritik birim, yaklaşık 650 m kalınlığıyla, sahadaki jeotermal sistemin rezervuar kayacı işlevini görmektedir. Ayrıca aynı çalışmada, bölgesel jeolojik evrime dayanan kavramsal bir model çerçevesinde, sistemin ısı kaynağını da bu granitik sokulumların oluşturabileceği değerlendirilmiştir.

Jeotermal Kaynakların Hidrojeokimyasal Özellikleri

Jeotermal akışkanların kimyasal bileşimi temel olarak su-kayaç etkileşimi süreçleri, yer altı akış yolları ve akışkanın rezervuar içerisindeki kalış süresi tarafından kontrol edilmektedir. Karışma ve soğuma süreçleri de akışkanın nihai bileşiminde rol oynamaktadır. Bu etkileşime bağlı reaksiyon hızı sıcaklığın bir fonksiyonu olup, ortam sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış reaksiyon hızını 2-3 kat yükseltmektedir (Eroğlu ve Aksoy, 2003).

Bu süreçlerin Çan ilçesindeki yansımaları, kaynakların kimyasal ve çevresel izotop analiz sonuçlarında izlenebilmektedir (Çizelge 2). Bölgedeki kaynaklar, anyon-kasyon dengeleri ile iz ve minör element dağılımları bakımından belirgin farklılıklar sergilemekte olup gözlenen bu farklılıklar akışkanların rezervuar sıcaklığı, kayaçla etkileşim düzeyi ve beslenme-dolaşım özellikleri hakkında bir hidrojeokimyasal çerçeve sunmaktadır. Jeotermal kaynaklarda hesaplanan CBE değerleri genel olarak kabul edilebilir sınırlar içinde kalmakla birlikte, Çan-Merkez sahasına ait Baba ve Deniz (2008) veri seti diğerlerine kıyasla belirgin biçimde yüksek bir hata oranı (%21,5) vermiştir. Bu durum büyük ölçüde, söz konusu veri setindeki SO_4^{2-} değerinin (721 mg/l), aynı sahaya ait diğer iki bağımsız veri setine (Yalçın, 2007: 1188 mg/l; Karaca vd., 2013: 1170 mg/l) kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ilgili veri seti yorumlamalarda diğer iki bağımsız veri setiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının farklı yıllara ait kimyasal ve çevresel izotop analiz sonuçları.

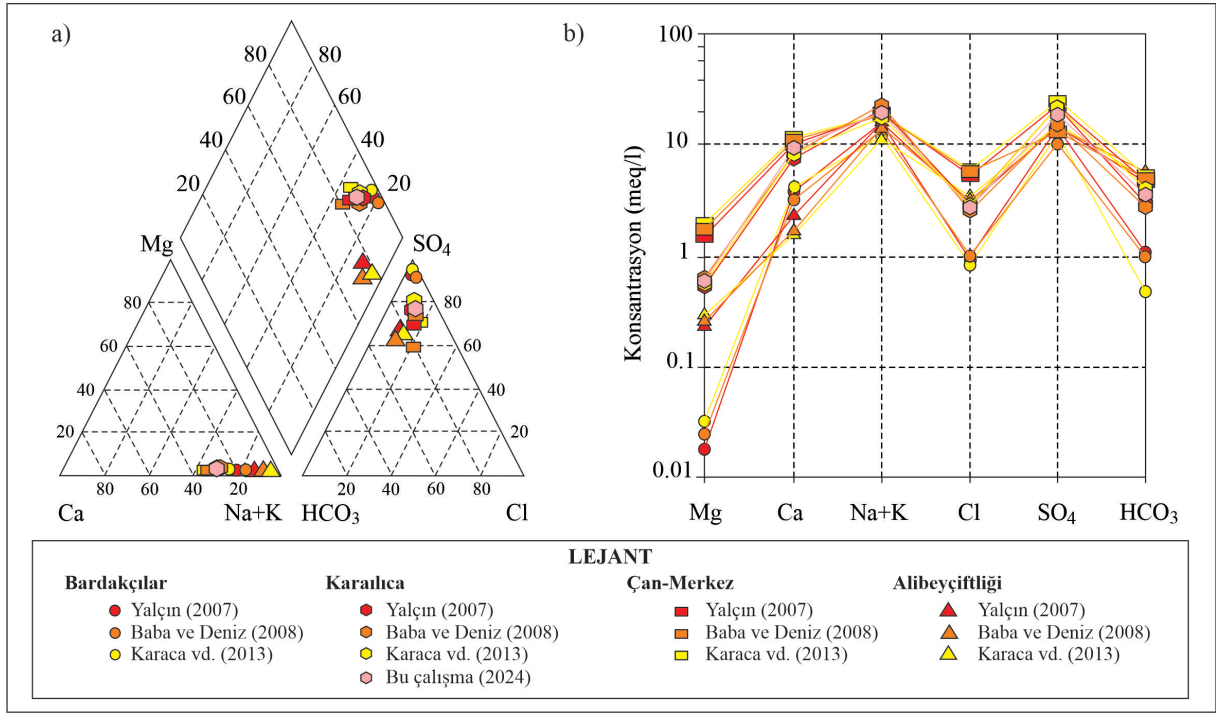
Table 2. Chemical and environmental isotope analysis results of the geothermal resources in the Çan district at different sampling periods.

Parametre	Alibeyçiftliği			Çan-Merkez			Karanlıca				Bardakçılar		
	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Bu çalışma (2024)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)
Na ⁺ (mg/l)	398	506,6	516,7	557	575,9	520	455	476,6	416,8	471,2	310	287,1	285,2
K ⁺ (mg/l)	33,3	13,32	13,43	21	27,01	35	16,9	23,23	20,41	21,7	6,7	7,2	6,94
Mg ⁺² (mg/l)	2,5	3,08	3,33	17,9	23,3	22	5,9	7,23	5,93	5,8	0,2	0,27	0,34
Ca ⁺² (mg/l)	43	30,5	30,17	194	238,2	217,2	148	175,1	148,9	159	75,8	83,5	87,1
Cl ⁻ (mg/l)	100	91	86	180	203	200	100	87	89	95,8	31	29	29
SO ₄ ⁻² (mg/l)	709	702	820	1188	721	1170	1037	1056	1020	1020	745	620	750
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	256	364,5	258	268	293,7	220	183	162	180	210	61	60,8	26,67
SiO ₂ (mg/l)	18,4	24,49	24,02	33	38,27	n.d.	49,6	58,32	50,14	55,83	54,5	70,01	71,66
F ⁻ (mg/l)	7,2	n.a.	n.a.	4,7	n.a.	n.a.	6,9	n.a.	n.a.	n.a.	5,9	n.a.	n.a.
As (µg/l)	n.d.	251,8	246,5	50	101,6	n.d.	100	55,7	91,8	100	n.d.	n.d.	n.d.
B (µg/l)	4100	2029	2414	3900	4050	4947	1600	1991	1877	2200	360	407	465
Fe (µg/l)	n.d.	102	20	710	2090	n.d.	350	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Li (µg/l)	700	607,2	709,2	1070	1146,8	1138	950	1082	1123	1000	120	128,2	142,8
Mn (µg/l)	n.d.	134,99	150,1	1,7	499,81	70	550	781,52	599,1	600	2,6	17,43	32,68
Sr (µg/l)	n.a.	666,76	694,1	n.a.	4360	3604	n.a.	3020	2780	n.d.	n.a.	1588	1665
δ ¹⁸ O (‰)	n.a.	-8,78	-8,91	-7,26	-7,49	-7,35	-8,8	-9,02	-9,06	n.a.	-9,16	-9,54	-9,61
δ ² H (‰)	n.a.	-58,35	-58,33	-59,55	-56,11	-57,3	-59,1	-60,63	-59,4	n.a.	-60,85	-59,93	-59,54
³ H (TU)	n.a.	0,43	n.a.	3,5	1,01	n.a.	0,55	0,31	n.a.	n.a.	0,05	0,22	n.a.
CBE (%)	2,98	2,11	1,81	2,45	21,49	3,66	1,23	6,17	0,24	3,66	0,2	6,77	0,26

n.d.: tespit sınırının altında / below detection limit, n.a.: veri mevcut değil / not available, CBE: iyonik denge hatası (%)

Bu çalışmada jeotermal akışkanın sınıflandırılması Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) ilkelerine göre yapılmış, majör iyon konsantrasyonları ise Piper (1944) ve Schoeller (1962) diyagramlarında değerlendirilerek Şekil 4a ve b'de sunulmuştur. Alibeyçiftliği jeotermal kaynağı Na-SO₄ fasiyesinde yer alırken; Bardakçılar düşük, Karanlıca ve Çan-Merkez ise

belirgin Ca katkısıyla Na-Ca-SO₄ hidrokimyasal fasiyesinde yer almaktadır. Tüm jeotermal kaynaklarda benzer katyon dizilimi (Na⁺+K⁺ > Ca⁺² > Mg⁺²) ve anyon dizilimi (SO₄⁻² > HCO₃⁻ > Cl⁻) gözlenmekte olup, bu durum kaynakların sülfat baskın bir hidrojeokimyasal fasiyese ait olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Jeotermal kaynakların a) Piper ve b) yarı logaritmik Schoeller diyagramlarında gösterimi.

Figure 4. Geothermal resources plotted on a) Piper and b) semi-logarithmic Schoeller diagrams.

Bununla birlikte, sahalar arasında gözlenen Ca^{+2} katkı derecesindeki farklılık, sahaya özgü su-kayaç etkileşim süreçlerinin de etkili olduğuna işaret etmektedir. En yüksek Na^+ , Ca^{+2} ve SO_4^{-2} konsantrasyonları Çan-Merkez jeotermal kaynağında tespit edilmiştir.

Yüksek Na^+ konsantrasyonu, volkanik kayalar içerisindeki feldispat minerallerinin hidrolizi ile ilişkilidir (Yalçın, 2007). Nitekim Deniz (2010) tarafından jeotermal alanların çevresindeki alterasyon zonlarında saptanan kaolinit (Karalıca'da) ile illit ve haloysit (Bardakçılar'da), bu yoğun feldispat bozunmasının sahaya özgü mineralojik göstergeleridir. Sülfatça zengin akışkanların kökeni ise Çan'ın batısında asit-sülfat koşullarında gelişmiş hidrotermal alterasyon zonlarında bulunan piritin oksidasyonu ile ilişkilendirilmiştir (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007). Alibeyçiftliği'nde saptanan jarosit minerali (Deniz, 2010), asidik ortamlarda pirit

oksidasyonu ile oluşan ikincil bir sülfat fazı olarak bu sürece işaret eden bir göstergedir.

Jeotermal akışkanlardaki Mg^{+2} derişimleri, akışkanın jeotermal olgunluk derecesini ve rezervuar mineralleriyle ulaştığı termodinamik denge durumunu yansıtan parametrelerden biridir. Düşük sıcaklıklı sularda önemli bir katyon olmasına karşın Mg^{+2} , yüksek sıcaklıklı ve nötr-alkali pH koşullarına sahip jeotermal sistemlerde ikincil alterasyon minerallerinin yapısına katılarak çökelmekte ve bu yolla akışkan fazındaki konsantrasyonu azalmaktadır (Guo vd., 2019). Bu kuramsal temel ışığında Bardakçılar'ın, en düşük Mg^{+2} (0,20-0,34 mg/l), en yüksek yüzey sıcaklığı (59 °C) ve en yüksek SiO_2 (54,5-71,66 mg/l) içeriğiyle bölgedeki diğer jeotermal sistemlere kıyasla daha derin dolaşımli bir sistemi temsil edebileceğine işaret etmektedir. Bu jeotermal alanda yüzlek veren hidrotermal alterasyona uğramış kayalarda klorit varlığının tespit edilmiş

olması (Deniz, 2010), bu yorumla mineralojik olarak da örtüşmektedir.

Jeotermal akışkanlarda belirlenen arsenik (As), mangan (Mn), demir (Fe), florür (F⁻) ve bor (B) konsantrasyonları, çevresel yönetim ve halk sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bileşenlerdir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) tarafından içme suları için önerilen As sınır değeri 10 µg/l'dir. Türkiye'de yürürlükte olan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2016) kapsamında ise As, Mn, F⁻, Fe ve B için belirlenen sınır değerler sırasıyla 10 µg/l, 50 µg/l, 1500 µg/l, 200 µg/l ve 1000 µg/l'dir. Çizelge 2'deki veriler bu sınır değerlerle karşılaştırıldığında, As, Mn ve B içeriğinin Bardakçılar dışındaki üç sahada, F⁻ içeriğinin ise tüm dört sahada, Fe içeriğinin de Çan-Merkez ve Karalıda ilgili limitleri belirgin biçimde aştığı görülmektedir. Bu nedenle jeotermal akışkanların doğrudan içme suyu amacıyla kullanımı uygun değildir. Ekosistemlerin korunması amacıyla deşarj öncesinde ileri arıtma teknolojilerinin uygulanması ve bölgesel ölçekte periyodik izleme çalışmalarının yürütülmesi önerilmektedir.

Jeotermal akışkanlardaki yüksek çözünmüş element içeriği, su kalitesi açısından bir çevresel yönetim sorunu oluştursa da kaynak yönetimi perspektifinden ele alındığında bir geri kazanım fırsatına dönüşebilmektedir. Bu konsantrasyonların temelinde yatan derin dolaşım su-kayaç etkileşimi tektonik ve magmatik aktivitenin sağladığı ısı kaynağıyla desteklenen bir süreç olarak akışkan fazına Li, B ve Sr gibi kritik elementleri taşımaktadır. Yüzey ve sığ yer altı sularının çok üzerindeki bu konsantrasyonlar, kontrolsüz deşarj hâlinde alıcı ortamların jeokimyasını değiştiren bir ekolojik risk taşıırken, aynı zamanda akışkanları kritik hammaddeler için sürdürülebilir bir kaynak olarak konumlandırmaktadır (Inzillo vd., 2026).

Karalıda ve Çan-Merkez jeotermal akışkanlarında ölçülen Li konsantrasyonları (1,12 ve 1,15 mg/l), uzun süreli su-kayaç etkileşimi yoluyla Li zenginleşmesinin gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu değerler hem dünya çapında yüksek Li içerikli jeotermal sahaların hem de Avrupa'nın görece sınırlı zenginleşme gösteren jeotermal sahalarının altında kalmaktadır. Salton Sea (200-300 mg/l; Zhang vd., 2025), Tibet'teki temsili yüksek düzeyde zenginleşmiş kaynaklar (Moluojiang, Semi, Zhumoshu ve Riruo; >35 mg/l; Zhang vd., 2025) ve Çin ulusal standardındaki endüstriyel tenör eşiği (50 mg/l; Wang vd., 2025) ile kıyaslandığında Çan verileri oldukça düşük düzeyde bulunmaktadır. Inzillo vd. (2026) tarafından derlenen Avrupa ölçeğindeki veri setiyle karşılaştırıldığında da aynı tablo geçerlidir. Çan-Merkez'deki Li konsantrasyonu, düşük-orta entalpili Avrupa jeotermal sahalarının en düşük uçtaki değerlerinin (Luigiane 1,4 mg/l; Font Mina 3,2 mg/l; Baden 4,8 mg/l) altında yer almakta, ticari ölçekte marjinal kabul edilen South Crofty maden suyundan (125 mg/l) yaklaşık 100 kat daha düşüktür. Benzer sonuçlar B ve Sr için de geçerlidir: Çan-Merkez'deki B derişimi (3,9-4,9 mg/l), düşük entalpili sistemler için bildirilen tipik aralığın (5-40 mg/l; örn. South Crofty 11 mg/l) altında kalırken, Sr içeriği (3,6-4,4 mg/l) South Crofty'nin (40 mg/l) ve yüksek entalpili (T > 150 °C) sahalarındaki (Rittershoffen 498 mg/l, Mofete 1310 mg/l) değerlerin çok altında kalmaktadır. Bu durum, Çan'daki jeotermal akışkanların doğrudan ekonomik element kazanımı için yeterli olmaktan ziyade, bölgesel su-kayaç etkileşim süreçlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Nitekim düşük tenörlü sahalarda dahi çıkarımın önündeki engel yalnızca konsantrasyon düzeyi değil, teknolojik olgunluk düzeyidir. Biga Yarımadası'ndaki Tuzla jeotermal alanında (Li: 20-25 mg/l) gerçekleştirilen pilot ölçekli saha çalışmaları, spinel-tip λ-MnO₂ sorbenti kullanılarak jeotermal akışkanlardan

adsorpsiyon yoluyla Li eldesinin teknik olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Tek geçişli saha geri kazanım oranının %1,3 olması ve yaklaşık %93'lük ürün saflığının batarya kalitesi standartlarının ($\geq$ %99,5) altında kalması, sürecin endüstriyel boyuttan ziyade henüz kavram-kanıtı aşamasında olduğuna işaret etmiştir (Toprak ve Demir, 2026). Tuzla'daki Li konsantrasyonunun Çan-Merkez'dekinden yaklaşık 20 kat daha yüksek olmasına karşın elde edilen geri kazanım verimliliğinin bu denli sınırlı kalması, benzer adsorpsiyon temelli yaklaşımların çok daha düşük derişimli akışkanlar için ancak ileri teknolojik gelişmelerle birlikte anlamlı hale gelebileceğini düşündürmektedir.

Doygunluk İndeksi ve Jeotermometre Uygulamaları

Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının rezervuar koşullarının değerlendirilmesinde, akışkanların mineral fazlarına göre doymunluk durumları ve farklı jeotermometre yöntemleriyle elde edilen rezervuar sıcaklıkları birlikte ele alınmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarından elde edilen doymunluk indeksi (SI) verileri, tüm kaynakların albit ve kuvars minerallerine göre doymunluk üstü olduğunu göstermektedir (Yalçın, 2007; Deniz, 2010). Deniz (2010), mikroklinin tüm kaynaklarda, adulya ve kalsedonun ise çoğunlukla aynı eğilimi sergilediğini, amorf silisin ise doymunluk altı değerlerde seyrettiğini saptamıştır. Aynı çalışmada elde edilen Alibeyçiftliği, Karalıca ve Bardakçılar sahalarındaki belirgin şekilde yüksek albit (1,35-5,02) ve mikroklin (2,3-6,24) SI değerleri, bu sahalarda feldispat-su etkileşiminin gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Sahalar arasındaki en belirgin fark kalsit doymunluğunda gözlenmektedir. Yalçın (2007)'a göre Çan-Merkez kaynağı hem dolomit hem de kalsite göre doymunluk üstüdür. Karalıca dengeye yakın veya hafif doymunluk altı bir karakter sergilerken (Deniz, 2010), Alibeyçiftliği'nde kalsit ve dolomit doymunluk altı değerlerdedir

(Yalçın, 2007). Bardakçılar ise en yüksek kalsit SI değerlerine sahip alan olarak öne çıkmaktadır (Deniz, 2010). Bu sonuç, söz konusu sahada 62-100 m aralığında kesilen rekristalize kireçtaşı seviyesinin (Bülbül vd., 2022) varlığıyla uyumludur. Bu bulgu, karbonat fazlarının akışkanın kimyasal evrimine katkı sağlamış olabileceğine işaret etmekte; bölgesel su-kayaç etkileşiminin de tutarlı bir tablo çizdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sahadaki kabuklaşma riskinin düzeyi yalnızca mineral doymunluk durumuna değil; akışkanın üretim debisi, sıcaklık düşüş hızı ve artezyen çıkışların sondaj üretimine dönüştürülme biçimine de bağlıdır.

Kimyasal jeotermometreler, sıcaklığa bağlı su-mineral dengesini temel alarak rezervuar denge sıcaklığının tahmin edilmesine olanak tanır (Nicholson, 1993; Chenaker vd., 2018). Çalışma kapsamında rezervuar sıcaklıklarının tahmininde silika (kuvars ve kalsedon) ve katyon (Na/K, Na-K-Ca ve Na/Li) çözünürlüklerine dayalı ampirik jeotermometre eşitlikleri kullanılmıştır (Çizelge 3).

Düşük sıcaklık ve yüksek kalsiyum derişimine sahip jeotermal akışkanlarda Na/K jeotermometreleri, gerçek rezervuar sıcaklığından daha yüksek değerler verme eğilimindedir. Na/K jeotermometreleri 180-350 °C aralığında güvenilir sonuçlar vermekte olup (Ellis, 1979), 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda Na/K oranı yalnızca feldispat dengesi tarafından değil, kil minerallerinin oluşumu gibi süreçler tarafından da etkilenmekte, bu da güvenilirliğini azaltmaktadır (Nicholson, 1993). Na-K-Ca jeotermometresi ise akışkandaki CO₂ derişiminden etkilenmekte olup (Giggenbach, 1988), suyun Ca⁺² derişimini etkileyen süreçlere karşı hassastır. Özellikle akışkan yüzeye çıkarken CO₂ kaybetmesi, kalsitin çökmesine ve Ca⁺² derişiminin azalmasına yol açarak hesaplanan sıcaklığın gerçek rezervuar sıcaklığından sapmasına neden olabilir; benzer bir etki sığ sulardan karışım yoluyla da ortaya çıkabilir.

Çizelge 3. Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının çeşitli jeotermometre yöntemleriyle hesaplanan rezervuar sıcaklıkları.

Table 3. Reservoir temperatures of the geothermal resources in the Çan district calculated using various geothermometer methods.

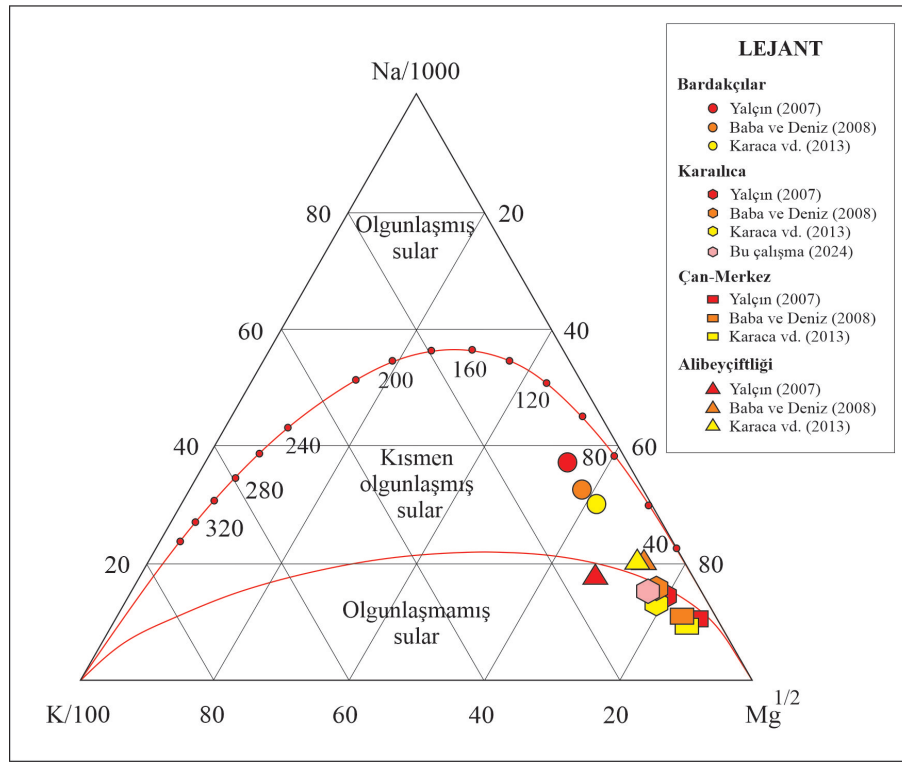
Jeotermal kaynak	Referans	Yüzey sıcaklığı (°C)	Jeotermometre hesaplaması (°C)						
			Kalsedon	Kuvars(a)	Kuvars(b)	Na/K(a)	Na/K(b)	Na-K-Ca	Na/Li
Alibeyçiftliği	Yalçın (2007)	31,5	28	60	66	202	169	168	177
	Baba ve Deniz (2008)	16,3	39	71	76	124	78	139	157
	Karaca vd. (2013)	29,7	39	70	75	124	77	140	163
Çan-Merkez	Yalçın (2007)	48,5	52	83	87	146	102	108	182
	Baba ve Deniz (2008)	46,1	59	90	92	160	118	113	184
	Karaca vd. (2013)	43	n.a.	n.a.	n.a.	185	149	124	189
Karalıca	Yalçın (2007)	50,2	71	101	102	145	101	104	186
	Baba ve Deniz (2008)	49	80	109	109	162	121	112	191
	Karaca vd. (2013)	47,9	72	102	103	163	122	110	202
	Bu çalışma (2024)	48,4	77	107	107	158	117	112	187
Bardakçılar	Yalçın (2007)	58,9	76	106	106	113	66	82	106
	Baba ve Deniz (2008)	52,9	90	118	117	122	75	82	112
	Karaca vd. (2013)	58,5	91	119	118	120	73	80	116

n.a.: veri mevcut değil / not available. Kalsedon (Fournier, 1977); Kuvars(a) - buhar kaybı yok / iletkenlik yoluyla soğuma (Fournier, 1977); Kuvars(b) - maksimum buhar kaybı / adiyabatik soğuma (Fournier, 1977); Na/K(a) (Fournier, 1979); Na/K(b) (Truesdell, 1976); Na-K-Ca (Fournier ve Truesdell, 1973, $\beta=4/3$); Na/Li (Fouillac ve Michard, 1981).

Bu jeotermometre 200 °C üzerindeki rezervuar sıcaklıklarında daha güvenilir sonuçlar vermektedir (Li vd., 2020). Na/Li jeotermometresinin geçerliliği belirli bir sıcaklık aralığından ziyade akışkanın tuzluluğuna (Cl^- derişimine) bağlıdır (Fouillac ve Michard, 1981); çalışma alanındaki tüm kaynaklar Cl^- derişimi bakımından seyreltik su ($\text{Cl}^- < 0,3$ mol/L) kategorisinde yer almaktadır. Ayrıca Na-Li iyon değişim dengesinin kurulabilmesi için akışkanın önceden Na-K dengesine ulaşmış olması gerektiği belirtilmiş olup (Li vd., 2021), bu durum Na/Li jeotermometre sonuçlarının temkinli değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Jeotermal kaynakların kökeni, dengeye ulaşmış olmalarının kontrolü ve uygun jeotermometre seçiminde ise Na-K-Mg üçgen diyagramından (Giggenbach, 1988) yararlanılmaktadır. Diyagramda, Bardakçılar kaynağına ait örnekler kısmen olgunlaşmış sular bölgesinde, Karalıca, Çan-Merkez ve Alibeyçiftliği kaynaklarına ait

örnekler ise olgunlaşmamış sular bölgesinde yer almakta olup, bu bölgede düzensiz dağılım gösteren suların anlamlı rezervuar sıcaklığı sonuçları vermediği bilinmektedir (Li vd., 2021; Stober ve Bucher, 2021) (Şekil 5). Katyon jeotermometresi sonuçları olgunlaşmamış sular grubunu oluşturan sahalarında yüzey sıcaklıklarından belirgin şekilde yüksek değerler üretmektedir. Bölgedeki sistemlerin görece düşük sıcaklıklı olması nedeniyle, akışkanın kayalarla tam dengeye ulaşmadan yüzeye ulaşması, düşük sıcaklıklarda Na/K oranının kil mineral etkileşimi gibi süreçlerden etkilenmesi (Nicholson, 1993) ve/veya yüzeye çıkış sırasındaki CO_2 kaybına bağlı kalsit çökelişi (Giggenbach, 1988), katyon jeotermometrelerinin gerçek rezervuar sıcaklığından yüksek sonuçlar vermesinin başlıca nedenleri arasında değerlendirilebilir. En düşük yüzey sıcaklığına sahip Alibeyçiftliği kaynağı, Na/K ve Na-K-Ca jeotermometrelerinde en yüksek değerleri sergilemektedir.



Şekil 5. Jeotermal kaynakların Na-K-Mg üçgen diyagramındaki (Giggenbach, 1988) konumu.

Figure 5. Distribution of the geothermal resources on the Na-K-Mg ternary diagram of Giggenbach (1988).

Bulgular, söz konusu üç sahada sistemin termodinamik dengeye ulaşmadığı sonucunu desteklemekte ve bu sahalarda katyon jeotermometreleri kullanımının güvenilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu sınırlılık tek bir mekanizmaya indirgenemez; örneğin Alibeyçiftliği'ndeki katyon jeotermometrelerindeki sıcaklık farklılıkları, olgunlaşmamış su karakterinin yanı sıra sahanın sınırlı debisi (0,5-1 l/sn), olası sığ su karışımı ve/veya iletim hatları boyunca yaşanabilecek kondüktif soğuma gibi süreçlerin bir arada etkisini yansıtır olabilir.

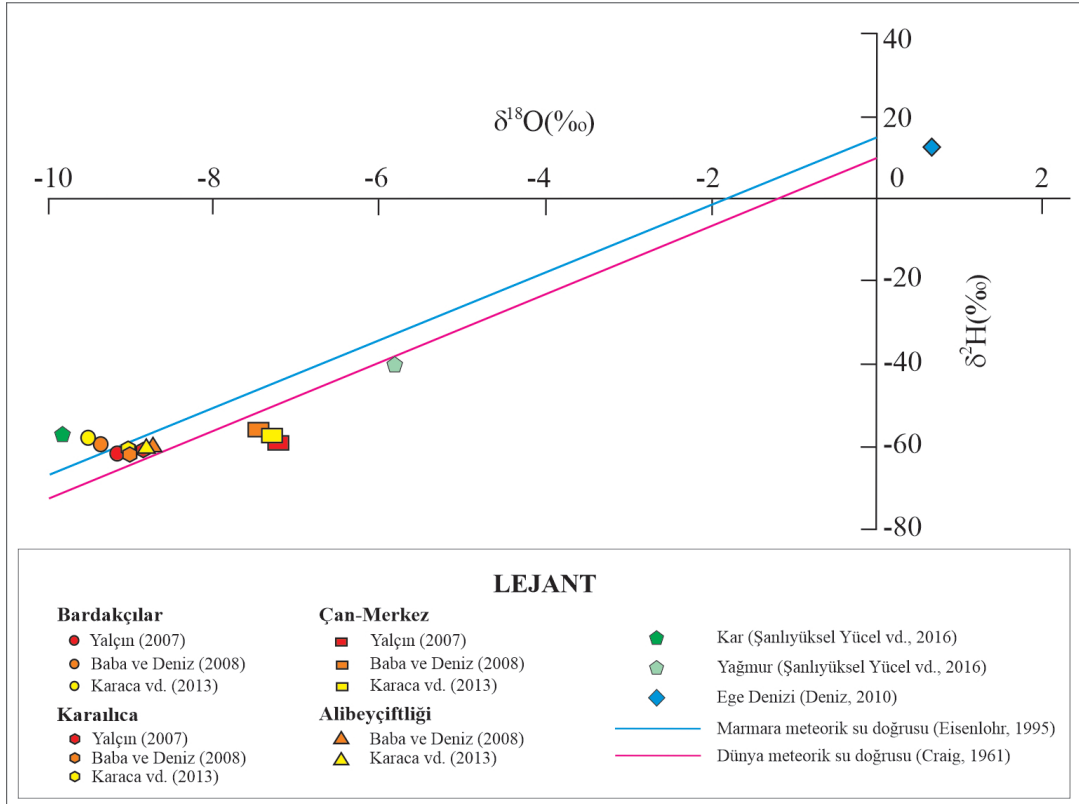
Buna karşın, silika jeotermometreleri tek bir mineralin sıcaklığa bağlı çözünürlüğünü esas aldığından, çok bileşenli katyon iyon değişim reaksiyonlarına kıyasla rezervuar kayacın karmaşık mineral bileşiminden ve iyon değişim dengesizliklerinden daha az etkilenmekte,

örnekleme ve analizinin görece kolay olması nedeniyle de jeotermal araştırmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Doğdu, 2004). Bu sahalara için de silika jeotermometreleri, katyon jeotermometrelerine kıyasla mevcut veriler çerçevesinde daha tutarlı tahminler sunmaktadır.

Kuars çözünürlüğüne dayalı jeotermometrelerin, yüksek sıcaklıklarda buhar kaybına bağlı düzeltmelerin belirginleşmesi nedeniyle özellikle ~250 °C'nin altındaki sistemlerde güvenilir sonuçlar verdiği vurgulanmaktadır (Fournier, 1977; Verma, 2000); ancak bu genel geçerlilik aralığı içinde dahi, silis çözünürlüğünü kontrol eden fazın sıcaklığa bağlı olarak değiştiği, 180 °C'nin üzerinde kuvarsın (Fournier, 1991), 140 °C'nin altında ise kalsedonun (Eroğlu ve Aksoy, 2003) baskın kontrolcü faz olduğu bilinmektedir. Nitekim çok bileşenli jeotermometre çalışmaları

da kuvars jeotermometresinin buhar kaybı düzeltilmesi yapılmadığında ve akışkanın yüzeye çıkışı sırasında sıg, seyreltik sularla karıştığında rezervuar sıcaklığını belirgin şekilde düşük tahmin edebildiğini göstermektedir (Peiffer vd., 2014). Bu durum, silis jeotermometrelerinin de kaynama veya ikincil çökeltim gibi süreçlerden tamamen bağımsız olmadığı anlamına gelmektedir; akışkanın yüzeye doğru yükselmesi sırasında çözünme-çökeltme veya yeniden dengelenme süreçleri de silis konsantrasyonunu etkileyebilmekte (Verma, 2000), ayrıca yaşanabilecek iletken veya adyabatik soğuma silisin çökeltmesine yol açabilmektedir (Fournier, 1989). Düşük-orta sıcaklıklı sistemlerde kalsedon jeotermometresinin rezervuar sıcaklığını daha uygun değerler vermesi beklenmektedir; çalışma alanındaki tüm sahalara için kalsedon jeotermometresi sonuçları esas alınmıştır.

Kuyu içi sıcaklık ölçümlerinin mevcut olduğu Çan-Merkez (48 °C, 144 m), Karalıda (61,9 °C, 450 m) ve Bardakçılar (67 °C, 750 m) sahalalarında, kalsedon sonuçları (sırasıyla 52-59 °C, 71-80 °C ve 76-91 °C) ölçülen kuyu içi sıcaklıklardan daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, rezervuarın kuyu tabanı derinliğinin ötesinde devam ettiğine ve derin sondajların yapılmasıyla kullanım potansiyelinin artabileceğine işaret etmektedir. Çan-Merkez’de bu sıcaklık farkına, ayrıca sahadaki değişken alüvyon kalınlığına (18-44 m) bağlı olarak akışkanın sıg soğuk yer altı sularıyla karışması da katkıda bulunuyor olabilir. Sondaj bulunmayan Alibeyçiftliği sahasında ise kalsedon sonuçları (28-39 °C) yüzey sıcaklığına (16,3-31,5 °C) diğer sahalara kıyasla belirgin şekilde yakın çıkmıştır; bu durum, sıg suyla karışım ve/veya nispeten sıg rezervuar olasılıklarıyla uyumludur.



Şekil 6. Jeotermal kaynakların $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ diyagramındaki konumu.

Figure 6. Location of the geothermal resources on the $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ diagram.

Bardakçılar'da elde edilen Na-K-Ca jeotermometre sonucu (80-82 °C) da kalsedon aralığıyla örtüşmektedir. Ancak bu jeotermometrenin yüksek sıcaklık değerlerinde (> 200 °C; Li vd., 2020) daha güvenilir olması nedeniyle rezervuar sıcaklığının doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmemiştir.

Çevresel İzotoplar ve Akışkanın Kökeni

Çan ilçesindeki jeotermal kaynakların oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) izotop verileri (Yalçın, 2007; Baba ve Deniz, 2008; Karaca vd., 2013) akışkanların kökenini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Çizelge 2). Değerlendirmede referans çerçevesi olarak Küresel meteorik su doğrusu (GMWL; $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961) ile Biga Yarımadası'nda geçerliliği kabul edilen Marmara meteorik su doğrusu (MMWL; $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 15$; Eisenlohr, 1995) esas alınmıştır (Şekil 6).

Baba vd. (2008), Kaz Dağı'nın kuzeydoğusunda bulunan soğuk su kaynaklarının büyük bölümünün GMWL ile MMWL arasında yer aldığını göstererek, sistemin ağırlıklı olarak modern meteorik sularla beslendiğini ortaya koymuştur. Çan ilçesinde Şanlıyüksel Yücel vd. (2016) tarafından ölçülen yerel kar örneği MMWL'nin üzerinde, yerel yağmur örneği ise GMWL'nin altında konumlanmaktadır (yağmur: $\delta^{18}\text{O} = -4,96$ ile $-5,91\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -25,06$ ile $-38,29\text{‰}$; kar: $\delta^{18}\text{O} = -9,84\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -58,24\text{‰}$).

Jeotermal akışkanın yer altı dolaşım süresini belirlemede yaygın olarak kullanılan trityum (^3H) içeriği, beslenme alanından boşalım noktasına kadar geçen süre hakkında bilgi vermektedir (Wei vd., 2021). Trityum içeriğinin 1 TU'nun altında olması, sistemin 1950'lerin başında başlayan termonükleer silah denemeleri öncesi beslenen daha yaşlı suları içerdiğine işaret etmekte; 1 TU'nun üzerindeki değerler ise ölçülebilir ^3H 'nin güncel beslenimini veya aktif bir karışım sürecini yansıtmaktadır (Clark ve Fritz, 1997).

Alibeyçiftliği jeotermal kaynağında ölçülen $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL-MMWL aralığında ve yerel kar bileşimine yakın konumlanmaktadır. ^3H içeriği (0,43 TU), baskın bileşenin 1950'ler öncesi beslenmiş, uzun yer altı kalış süresine sahip yaşlı sulardan oluştuğuna işaret etmekte, düşük oranda modern su katkısının da eşlik edebileceğini düşündürmektedir.

Çan-Merkez kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ değerleri diğer sahalardan belirgin biçimde daha az negatif olup yerel kar ile yağmur örnekleri arasında yer almaktadır; buna karşılık $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL ve MMWL'nin oldukça altında, yerel kar örneğinin bileşimine yakın konumda sabit kalmaktadır. Bu asimetrik konum, jeotermal akışkanın yüksek sıcaklıkta kayaç/ CO_2 ile girdiği derin bir etkileşim sonucu $\delta^{18}\text{O}$ bakımından zenginleştiğine işaret etmektedir. Bu kaynak, dört saha arasındaki en yüksek HCO_3^- derişimi (268 mg/l) ve en yüksek alkalinite değeriyle (4,4 mmol/l) bu CO_2 girdisini destekleyen jeokimyasal veriler sunmaktadır (Yalçın, 2007). Derin kökenli izotopik kaymadan bağımsız olarak, sahada ikinci ve sığ bir süreç daha etkilidir. Diğer sahalara kıyasla jeotermal akışkanın yüksek ve değişken ^3H içeriği (1,01-3,5 TU) Kocabaş Çayı alüvyon akiferiyle kurulan aktif hidrolik bağlantı sonucu sisteme dönemsel olarak katılan modern su bileşenini yansıtmaktadır.

Karalıda kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL-MMWL aralığında yer almaktadır. ^3H içeriği (0,31-0,55 TU) 1 TU eşliğinin altında kalarak baskın bileşenin, Alibeyçiftliği'nde olduğu gibi, uzun yer altı kalış süresine sahip yaşlı sulardan oluştuğuna işaret etmektedir. Ancak üst sınırın Alibeyçiftliği'nde ölçülen değere kıyasla bir miktar daha yüksek olması, derin jeotermal bileşene majör iyon ve silika verileriyle de desteklenen sınırlı bir modern/sığ su katkısının eşlik edebileceğini düşündürmektedir.

Bardakçılar kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL ile MMWL arasında yer almakta ve yerel kar örneğinin bileşimine yakın

konumlanmaktadır. Sahada ölçülen oldukça düşük ^3H değerleri (0,05-0,22 TU), Baba vd. (2008) tarafından bölgedeki soğuk su kaynaklarında saptanan 1,55-6,7 TU değerinin oldukça altında kalarak sistemin bölgedeki diğer jeotermal sistemlere kıyasla belirgin şekilde daha uzun bir yer altı kalış süresine sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu bulgu, sahanın Mg^{+2} - SiO_2 ilişkisi, Giggenbach diyagramındaki kısmen olgunlaşmış sular konumu ve jeotermometreler arası en yüksek tutarlılıkla birlikte değerlendirildiğinde, sistemin bölgedeki diğer sahalarla göre daha derin sirkülasyonlu bir hidrojeolojik yapı sergilediği sonucunu desteklemektedir.

Tüm sahalarla ait $\delta^{18}\text{O}$ değerleri Hedenquist ve Lowenstern (1994)'in magmatik su aralığının ($\delta^{18}\text{O}$: +5,5 ile +9,5‰; $\delta^2\text{H}$: -40 ile -80‰) belirgin biçimde dışında kalarak magmatik katkının ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Ege Denizi izotop verileri ($\delta^{18}\text{O} \approx +0,64$ -+1,59‰; $\delta^2\text{H} \approx +11,43$ -+15,56‰, Deniz, 2010) ile karşılaştırması da denizel köken olasılığını ortadan kaldırmaktadır. Bardakçılar, Karalıda ve Alibeyçiftliği sahalarına ait $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerlerinin GMWL-MMWL aralığında yer alması, bu kaynakların temel beslenme kaynağının bölgesel meteorik sular olduğunun açık bir göstergesidir. Bu konum, aynı zamanda uzun yer altı kalış süreleri ve geçmiş iklimsel beslenme modelleriyle uyumlu bir tablo ortaya koymaktadır. Nitekim Yalçın (2007), bölgede Kaz Dağı'ndan daha yüksek bir rakım bulunmaması nedeniyle bu tür düşük izotopik bileşimleri soğuk iklim koşulları altında gerçekleşen yağışlarla ilişkilendirmiş; ayrıca Kaz Dağı'ndan uzaklaştıkça $\delta^2\text{H}$ 'nin daha negatife kaydığını ($R^2 = 0,81$) saptayarak bunu yüksek rakımlı beslenimden çok soğuk iklim yağışları ve uzun yer altı kalış süreleriyle açıklamıştır. Buna karşın Çan-Merkez'deki daha az negatif $\delta^{18}\text{O}$ değerleri, yukarıda tartışıldığı üzere büyük ölçüde CO_2 -su etkileşimine bağlı bir $\delta^{18}\text{O}$ kaymasını yansıtmakta; Kocabaş Çayı alüvyon akiferiyle olan hidrolik bağlantı ise sistemin ^3H içeriğindeki

dönemsel değişkenliği açıklamaktadır. Baba vd. (2008) tarafından bölgedeki soğuk su kaynaklarında belirlenen yükseklik- $\delta^{18}\text{O}$ ilişkisi ($y = -0,0025x - 7,0995$; $-0,25\text{‰}/100 \text{ m}$), literatürdeki genel eğilimle (Yurtsever ve Gat, 1981; Clark ve Fritz, 1997) uyumludur ve sahalar arasındaki izotopik farkları nicel bir çerçevede değerlendirmeye imkân tanımaktadır. Bu ayrımın kesinleştirilmesi için ise sistematik yağış izotop verisine ihtiyaç duyulmaktadır.

ÇAN ve ÇEVRESİNDEKİ MADENCİLİK FAALİYETLERİ

Metalik Maden Potansiyeli

Biga Yarımadası'nın çok evreli, karmaşık ve geçişli tektonik evrimi; stratigrafik gelişim, metamorfik zonlanma, magmatizma ve buna bağlı metalojenik sistemleri birlikte kontrol eden bölgesel ölçekli bir jeodinamik çerçeve sunmaktadır (Okay vd., 1990). Yiğit (2012), Biga Yarımadası'nı Tetis Metalojenik Kuşağı içerisinde 18-52 My aralığındaki Senozoyik kalk-alkali magmatizma ile şekillenmiş, ekonomik açıdan önemli cevherleşmeler barındıran bir metalojenik bölge olarak tanımlamıştır. Engin vd. (2012), bölgedeki intrüzif ve ekstrüzif kayaçların başlıca iki evrede geliştiğini; bir grubun Jura öncesi döneme, diğer grubun ise metalojenik açıdan belirleyici olan Oligo-Miyosen dönemine ait olduğunu belirtmiştir. Metalik cevherleşmelerin mekânsal dağılımı da bu ikinci evredeki ekstrüzif ve intrüzif kayaçlarla doğrudan ilişkilidir.

Biga Yarımadası genelinde, porfiri bakır-altın (Cu-Au), epitermal Au ve baz metal skarn sistemleri başta olmak üzere, farklı metal gruplarına ait toplam 205 maden yatağı ve zuhuru tanımlanmıştır (Engin vd., 2012). Bölge; Cu-Au $\pm$ Mo porfiri, Fe $\pm$ Cu proksimal ve Pb-Zn-Cu distal skarn ile Au-Ag ve Pb-Zn-Cu $\pm$ Ag $\pm$ Au epitermal yüksek sülfidasyon (HS), orta sülfidasyon (IS) ve düşük sülfidasyon (LS) tipte

cevherleşmeleri içermektedir (Yiğit, 2012; Kuşcu vd., 2019; Çiçek vd., 2021; Demirela ve Akıska, 2022). Maden yataklarının dağılımı KD-GB uzanımlı bir metalojenik zonlanma sergilemekte olup (Engin vd., 2012), bu dağılım bölgenin ana tektonik dokusunu yansıtan KD-GB doğrultulu doğrultu atımlı fay sistemleriyle (KAFZ batı uzantısı) de ilişkilendirilmektedir (Yiğit, 2012). Söz konusu zonlanma yapısına bağlı olarak, bölgenin geleneksel metallerin yanı sıra sülfür minerallerine bağlı yan ürünler (galyum (Ga), germanyum (Ge), selenyum (Se), kadmiyum (Cd), indiyum (In), tellür (Te), renyum (Re) ve talyum (Tl) vb.) açısından da jeokimyasal potansiyel taşıdığı öngörülmektedir (Engin vd., 2012).

Bölgede potansiyel taşıyan Cd, Ga, Ge ve In gibi elementlerin, ETKB (2025) tarafından hazırlanan Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu kapsamında kritik madenler kategorisinde yer alması, Biga Yarımadası'nın metalojenik önemini ulusal hammadde güvenliği stratejileriyle ilişkilendirmektedir. Bahsi geçen elementlerden Ga, Ge, In, Te ve Re ise USGS'in (2026a) güncel kritik mineraller listesinde de yer alarak bu metalojenik potansiyelin uluslararası ölçekte kritik kabul edildiğine işaret etmektedir. Ayrıca bölgede küçük rezervli Mn ile bölgesel ölçekte cıva (Hg) ve volfram (W) potansiyelinin de bulunduğu bildirilmiştir (Gedikoğlu, 2011; Engin vd., 2012).

Bu genel çerçeve içinde, Çan ve yakın çevresi, porfiri, epitermal ve skarn tipi cevherleşmelerin bir arada gözlemlendiği alt bölgelerden biridir. Özellikle Oligo-Miyosen yaşlı volkanik ve intrüzif kayaçların yaygın olduğu sahalardaki Au, Cu, Pb, Zn ve Fe cevherleşmeleri, bölgedeki güncel madencilik faaliyetlerinin odağını oluşturmaktadır. Yatak ve zuhurların mekânsal dağılımı, bölgede baskın olan tektonik hatlar ile bunlara eşlik eden ikincil fay sistemleri tarafından kontrol edilmektedir (Engin vd., 2012; Yiğit, 2012). Bu yapısal ve jeolojik özellikler, Çan ilçesinin Biga Yarımadası içerisinde metalik maden potansiyeli

açısından ekonomik değeri yüksek alt bölgelerden biri olduğuna işaret etmektedir.

Bölgedeki metalojenik potansiyelin örneklerinden biri olan Halılağa (Cu-Au) porfiri sistemi, Biga Yarımadası'nın Eosen'den Geç Oligosen'e uzanan jeodinamik evrimini yansıtan, çok evreli ve uzun süreli bir magmatik-hidrotermal sürecin ürünüdür. Jeokronolojik veriler; Halılağa sistemindeki magmatik ve hidrotermal etkinliğin, ~39,56 My'daki Eosen evresi (molibdenitte Re-Os) ile ~26,27-24,81 My aralığındaki Geç Oligosen evresi (hidrotermal serisit ve K-feldispatta Ar-Ar) olmak üzere iki ana evrede yoğunlaştığını göstermektedir (Brunetti, 2016; Sánchez vd., 2016; Kuşcu vd., 2019).

Doerksen vd. (2015) tarafından, Halılağa sahasında porfiri sokulumunun (Kestane zonu) yaklaşık 4 km güneydoğusunda (Bakırlık zonu) bakır içerikli granat skarn mineralizasyonu bulunduğu ifade edilmiştir. Aynı raporda, Kestane zonunun yaklaşık 1 km batısında ise hornfels ile rekristalize kireçtaşı arasındaki kontakta kesilen ayrı bir skarn zonunda, dar bir aralıkta (1,9 m) ortalama %16,76 Zn tenörlü yüksek dereceli çinko mineralizasyonu, anomali düzeyinde Au (0,099 ppm) ve Cu (%0,192) ile tespit edilmiştir. Kestane zonunun güneyinde yer alan Kunk Tepe'de ise yüksek kesimlerde HS epitermal altın mineralizasyonu (kuvars-alünit, arjilikten ileri arjiliğe değişen alterasyon) gözlenmektedir (Doerksen vd., 2015). Bu birliktelik, porfiri, skarn ve epitermal sistemlerin aynı magmatik-hidrotermal etkinliğe bağlı tek bir zonlu sistemin parçaları olduğuna işaret etmektedir (Doerksen vd., 2015). Sistem, merkezde düşük tenörlü potasik (biyotit-manyetit $\pm$ K-feldispata) bir çekirdek ve bunu üzerleyen fillik (kuvars-serisit-pirit) alterasyonla, çevresinde propilitik (klorit-epidot) alterasyon ile karakterizedir. En yüksek Au-Cu tenörleri ise bu çekirdeği çevreleyen kesimlerde, yoğun kuvars-manyetit-sülfür damar ağlarıyla ilişkili olarak gözlenmektedir (Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016). Halılağa porfiri

sistemi yüzeyinde, kuvars açısından zengin bir porfir sokulumu içinde yer alan limonit-götit ve kuvars stokvörkünden oluşan, asitle yıkanmış limonitik bir kabuk bulunmaktadır (Sánchez vd., 2016; Yılmaz vd., 2019).

Sahadaki sondaj verilerine göre 182,7 Mt belirlenmiş kaynak, %0,27 Cu, 0,30 g/t Au ve %0,0057 Mo tenörüne sahiptir. Mümkün kaynak ise 178,7 Mt olup %0,23 Cu, 0,24 g/t Au ve %0,0087 Mo tenörü içermektedir (Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016). Kayaç jeokimyası analizlerinde Cu derişimleri çoğunlukla 500 ppm'in üzerinde olup, Au içeriği genellikle 0,5-1 ppm aralığında, en yüksek değer ise 3,37 ppm olarak saptanmıştır (Yılmaz vd., 2019).

Kaynak tahminlerinin ötesinde, sahanın işletme planlaması da ilerlemiş durumdadır: proje sahibi şirketin güncel raporlarına göre, Halılağa sahası 2 yıl arazi hazırlığı, 15 yıl işletme ve 2 yıl rehabilitasyon aşamalarını kapsayan toplam 19 yıllık bir proje ömrüne sahip olup, işletme süreci boyunca yıllık 6 Mt kapasiteyle toplamda 90 Mt bakır cevheri üretimi hedeflenmektedir (Truva Bakır, 2026).

Çan ilçesindeki bir diğer önemli metalik maden sahası olan **Ağı Dağı** (Au-Ag), Oligosen yaşlı çarpışma sonrası magmatizma tarafından kontrol edilen, HS epitermal bir sistemdir. Bölgesel ölçekte KD-GB ve D-B doğrultulu fay sistemleri, bu evrede hâkim olan genişlemeli rejim altında magmatik merkezlerin konumlanmasını ve hidrotermal akışkanların yollarını denetleyerek cevherleşmenin mekânsal dağılımını belirlemiştir (Yiğit, 2012). Mineralizasyon, dasitik-riyolitik lav kubbeleri, volkanoklastik birimler ile freatik breşler içerisinde gelişmiştir (Yiğit, 2012). Yatak, merkezde masif ve boşluklu silisleşme, bunu çevreleyen ileri arjilik alterasyon zonu (alünit-dikit-pirofilit-kaolinit) ve dış çeperde gelişen arjilik zon ile tanımlanır (Cunningham-Dunlop ve Lee, 2007).

Kuşcu vd. (2019) tarafından belirlenen

jeokronolojik veriler, Ağı Dağı'nın HS epitermal mineralizasyon yaşının ($26,36 \pm 0,16$ My) Halılağa'da tespit edilen genç bir hidrotermal serisitik alterasyon evresi yaşı ($26,27 \pm 0,19$ My) ile örtüştüğünü göstermektedir; bu ikincil olay, Halılağa porfiri sisteminin asıl oluşum yaşından ($\sim 39,5$ My, Eosen; Brunetti, 2016) belirgin şekilde daha gençtir. Bu kronolojik örtüşme, her iki sistemde de benzer zamanlı alterasyon süreçlerini tetiklemiş olabilecek ortak bir bölgesel Geç Oligosen hidrotermal etkinliği işaret etmektedir.

Sahada tanımlanan mineralize zonlar arasında, özellikle Baba Dağı ve Ayıtepe zonlarında, oksit zonda Mo içeriği 500 ppm'e kadar yükselirken sülfür zonunda yaklaşık 50 ppm düzeyinde kalmaktadır (Cunningham-Dunlop ve Lee, 2007; Yiğit, 2012). Bu kontrast, sistemin derinlerinde porfiri Au-Mo ile ilişkili bir magmatik-hidrotermal çekirdeğin varlığına işaret etmekte ve epitermal-porfiri geçişine dair kılavuz bir element göstergesi sunmaktadır. Baba Dağı (26,6 Mt; 0,52 g/t Au) ve Deli Dağı (25,4 Mt; 0,67 g/t Au) zonlarına ait kaynak tahminlerinin (Yiğit, 2012) yanı sıra, sahada tamamlanan fizibilite çalışmaları kapsamında hesaplanan toplam görünür ve muhtemel rezerv 54,4 Mt cevherde 0,67 g/t Au tenörü ile yaklaşık 1,17 Moz Au içermektedir (Cormier vd., 2017). Söz konusu veriler, Ağı Dağı sahasının Biga Yarımadası'ndaki en büyük HS epitermal Au sistemlerinden biri olduğuna işaret etmektedir (Yiğit, 2012). Hâlihazırda üretim aşamasına geçmemiş olan saha, yatırım ve geliştirme süreçleri kapsamında değerlendirilmeye devam etmektedir.

Çan ilçesindeki Pb-Zn cevherleşmelerini temsil eden ve yer altı işletmesi olarak faaliyet gösteren Kumarlar ve Kocayayla sahalarında, bölgenin polimetallik baz metal potansiyeli günümüzde değişken ekonomik ve teknik koşullara bağlı olarak kesintili bir üretim süreciyle değerlendirilmektedir. **Kumarlar** polimetallik (Pb-Zn-Cu $\pm$ Au) sahası, yapısal kontrollü bir LS-IS epitermal sistemdir (Bozkaya ve Banks, 2015).

Sahanın litolojisi andezit, tuf ve aglomeradan oluşmaktadır (Demirela ve Akıska, 2022; Abaka, 2024). Cevherleşme, bu birimleri kesen K-G (Çelik, 2009) ve KD-GB doğrultulu, KB-GD dalımlı tektonik hatlar boyunca damar tipinde, saçınımlı ve ağsal yapıda gelişmektedir (Demirela ve Akıska, 2022). Hidrotermal alterasyon, cevherleşme zonu ve yakın çevresindeki tüflerde yoğun silisleşme ve serisitleşme ile karakterize edilirken (Çelik, 2009), cevherli damarları çevreleyen andezitik yan kayaçta propilitik alterasyon baskın olarak gözlenmektedir (Demirela ve Akıska, 2022).

Sistemin mineralojik parajenezini ana bileşen olarak galenit ve sfalerit oluşturmakta; kalkopirit, pirit, fahlerz, markazit, kovellin, limonit ve nabit altın bunlara eşlik etmektedir (Çelik, 2009; Demirela ve Akıska, 2022). Gang minerali olarak kuvars boşluklarda ikinci bir evrede gelişmiştir (Çelik, 2009); ayrıca kalsit, adularya ve klorit saptanmıştır (Demirela ve Akıska, 2022; Abaka, 2024). Bozkaya ve Banks (2015) tarafından, cevherin önemli bir bölümünün sismik olaylarla tetiklenen ani basınç düşümü mekanizması sonucu çökelen amorf silis bantları içerisinde hapsediği ortaya konmuştur. Bu bantlarda ortalama 0,2 ppm Au ve 1,31 ppm Ag saptanmıştır (Bozkaya ve Banks, 2015). Aynı çalışmada, amorf silis örneklerinde Sb (24,3 ppm), Cd (1,77 ppm) ve Ge (1,26 ppm) içerikleri de belirlenmiştir.

Kocayayla polimetalik (Pb-Zn $\pm$ Cu) yatağı, Au-fakir IS tipi epitermal bir sistem olarak sınıflandırılmıştır (Akıska ve Demirela, 2026). Wagner vd. (1985), sahada yatağın işletme geçmişine ışık tutan altı adet terk edilmiş kısa galeri bulunduğunu belirtmiştir. Cevherleşme, andezitik-bazaltik volkanikler ile serisit şist ve serisit-grafit şistlerden oluşan yan kayaçlar içerisinde hidrotermal damarlar şeklinde gelişmiştir; sahanın kuzeyinde ise granodiyorit mostrası bulunmaktadır. Sahadan alınan galenit örneklerinin Pb izotop model yaş ortalaması yaklaşık 12,2 My olarak belirlenmiştir (Demirela ve Akıska, 2022). Yiğit (2012) sahada saptadığı serisitik alterasyonla ilişkili Cu-Mo anomalisi

gösteren stokvörk cevherleşmenin porfiri sisteme işaret ettiğini belirtmiştir.

Hidrotermal alterasyon, damar ve cevherleşme zonları çevresinde yoğun silisleşme ve kloritleşme ile karakterize edilirken, mineralojik analizler serisit-kuvars-kaolinit/nakrit-pirit birlikteliğinden oluşan filik-arjilik ile klorit-kalsit/dolomit-kuvars-pirit birlikteliğinden oluşan propilitik olmak üzere iki temel alterasyon zonunun varlığını ortaya koymaktadır (Akıska ve Demirela, 2026). Sistemin mineralojik parajenezini ana bileşen olarak galenit ve sfalerit oluşturmaktadır; kalkopirit, pirit ve tenantit gibi mineraller bunlara eşlik etmektedir; gang mineralleri ise kuvars ve baritir (Gjelsvik, 1962). Gjelsvik (1962) tarafından saptanan breşleşmiş dokanak zonunda kalkopiritin pirit ve sfaleritten sonra, ancak tenantitten önce oluştuğu belirlenmiş olup, bu durum cevherleşmenin çok evreli bir hidrotermal süreçten geçtiğini düşündürmektedir. Akıska ve Demirela (2026) tarafından sahada yapılan jeokimyasal analizler, cevher örneklerinin Pb (25,3-33.200 ppm), Zn (116,6-9151,5 ppm), Cu (6,4-601,1 ppm) ve As (0,2-76,5 ppm) dahil olmak üzere baz metaller ve ilişkili elementlerde belirgin bir zenginleşme, Cd (0,10-36,84 ppm), Sb (0,50-34,86 ppm) ve Ag (0,05-7,46 ppm) içeriklerinde ise yükselmiş değerler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu birlikte zenginleşmenin galenit ve sfalerit kafesine ikame veya minör sülfotuz fazları şeklinde gerçekleştiği ve hidrotermal kökeni desteklediği belirtilmiştir.

Çan ilçesinin kuzeydoğusunda bulunan **Yuvalar** Fe-Cu skarn yatağı, bölgedeki yoğun antik metalürji faaliyetlerinin izlerini barındırmaktadır. Sahadaki cevherleşme, granodiyorit sokulumu ile mika-şist ve mermer aralanmasından oluşan metamorfik istif arasındaki dokanak boyunca gelişen bir skarn zonu içerisinde oluşmuştur; yatağın başlıca cevher mineralleri kalkopirit, pirit, hematit, limonit ve malakittir (Pernicka vd., 2003). Yatağın jeolojik oluşum yaşına dair kapsamlı bir radyometrik çalışma bulunmamakla birlikte; madencilik faaliyetlerinin tarihsel geçmişine

ışık tutan termolüminesans verileri (Wagner vd., 1985) ve bölgedeki cüruf yığınları içerisinde saptanan Arkaik Dönem (MÖ 8-5. yy.) ile Bizans İmparatorluğu arasına tarihlenen seramik buluntuları, sahanın uzun süreli bir kullanım geçmişine sahip olabileceğini göstermektedir (Körpe, 2024).

Wagner vd. (1985), Yuvalar sahasını bölgede bakır ergitilen merkezlerden biri olarak tanımlamış; Pernicka vd. (2003) ise radyokarbon ve termolüminesans verilerine dayanarak sahadaki bakır üretiminin MÖ 2. binyıl ile Roma dönemi olmak üzere en az iki ayrı evrede gerçekleştiğini belirtmiştir. Fırın kalıntıları üzerinde yapılan termolüminesans analizleri, Roma dönemi metalürjik faaliyetlerinin yaklaşık MS 70 ± 170 civarına tarihlendiğini göstermektedir. Toplam kütlesi yaklaşık 100.000 t olarak tahmin edilen yedi büyük cüruf yığını, sahanın bu dönemdeki arkeometalürjik önemini destekleyen başlıca göstergeler arasındadır. Mineralojik veriler, işletilen ana cevherin kalkopirit olduğunu ve ergitme sürecinde yerel demir kaynaklarının (özellikle limonit) akı maddesi olarak kullanıldığını göstermektedir; jeokimyasal analizi yapılan bir cüruf örneğinde FeO içeriği ağırlıkça %60,3 olarak saptanmıştır (Wagner vd., 1985).

Yuvalar köyü kuzeyindeki Demirli mevkiinde, yaklaşık bir kilometreye yayılan cüruf depolama alanı, antik Troas bölgesinde (Biga Yarımadası'nın büyük bölümünü kapsayan tarihi bölge) bugüne kadar tespit edilen en büyük arkeometalürjik atık sahasıdır (Atabay ve Körpe, 2019). Sahada yürütülen güncel maden arama ve sondaj faaliyetleri kapsamında, bölgenin mineralizasyon potansiyeli mühendislik ve rezerv geliştirme standartları çerçevesinde değerlendirilmektedir (Sütun Enerji, 2026).

Çan ve yakın çevresi, Halılağa porfiri sisteminden, Ağı Dağı HS epitermal sisteme, Kumarlar ve Kocayayla LS-IS/IS tipi epitermal polimetallik damar yataklarına ve Yuvalar skarn yatağına uzanan geniş bir metalojenik spektrum

barındırmaktadır. Söz konusu yatakların cevher parajenezindeki metal çeşitliliği, yalnızca ana metal üretimiyle sınırlı kalmayıp, yan ürün olarak geri kazanılabilecek kritik mineraller açısından da önemli bir katma değer kaynağı olabileceğine işaret etmektedir. Kumarlar sahasındaki Sb ve Ge içerikleri (Bozkaya ve Banks, 2015), Kocayayla sahasındaki Zn, Sb ve Ag zenginleşmesi (Akıska ve Demirela, 2026) ve Halılağa sahasında Kestane zonu yakınındaki skarn zonunda saptanan Zn mineralizasyonu (Doerksen vd., 2015), bu sahaların USGS (2026a) güncel kritik mineraller listesinde yer alan yüksek teknoloji metalleri açısından da potansiyel taşıdığını düşündürmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu listede yer alan kritik minerallerin bölgedeki metalik maden yataklarında somut potansiyelinin doğrulanması ve ekonomik değerlendirilebilirliğinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Söz konusu çeşitlilik, bölgenin jeolojik evrimindeki çok evreli magmatik faaliyetlerin ve bunlara eşlik eden hidrotermal süreçlerin zamansal ve mekânsal sürekliliğini yansıtmaktadır. Hidrotermal aktivite, yalnızca metalik cevherleşmelerle sınırlı kalmamış, yan kayaçlarda gelişen yoğun alterasyon süreçleri aracılığıyla, bölgedeki endüstriyel hammadde oluşumları için de uygun bir jeokimyasal zemin hazırlamıştır.

Endüstriyel Hammadde Potansiyeli

Biga Yarımadası'nda 124 farklı lokasyonda tanımlanmış toplam 26 çeşit endüstriyel hammadde kaynağı bulunmaktadır (Erdoğan vd., 2012). Çan ilçesi, yarımadaının karmaşık tektono-magmatik evrimiyle uyumlu bir jeolojik yapı sergilemektedir. Özellikle Oligo-Miyosen yaşlı kalk-alkali magmatizmanın ürünü olan Çan volkanitlerine ait kayaçlar yoğun hidrotermal alterasyon süreçlerine maruz kalmış ve bu durum bölgeye önemli bir endüstriyel hammadde potansiyeli kazandırmıştır (Ercan vd., 1995). Başta kaolinleşme ve silisleşme olmak üzere gelişen bu alterasyon zonlarının geniş yayılımı, Çan'ı seramik ve cam sanayisinin temel

girdileri olan kaolin ve sileks açısından ulusal ölçekte önemli bir üretim merkezi konumuna taşımaktadır. Bölgedeki magmatik kayalara bağlı feldispat ve kuvars rezervleri de bu potansiyele katkı sağlamaktadır. Seramik sanayisine yönelik bu potansiyele ek olarak; agrega üretimi, inşaat ve enerji sektöründe değerlendirilen kalker oluşumları ile dekoratif amaçlı kullanılan Çan taşı bölgenin diğer önemli endüstriyel kaynaklarını oluşturmaktadır.

Bölgedeki en karakteristik **kaolin** yatakları, KD-GB doğrultulu ÇBFZ üzerinde konumlanan Bahadırılı, Duman ve Çaltıkara ocaklarında gözlenmektedir. Ayrıca Tepeköy, Büyüktepe ve Çekiçler ocakları, bölgedeki kaolinleşmenin mekânsal sürekliliğini ve ekonomik potansiyelini temsil eden diğer önemli sahalarlardır. Bahadırılı, Çaltıkara ve Duman ocaklarında yapılan mineralojik, jeokimyasal ve izotopik çalışmalar kaolinleşmenin gelişim mekanizmasını ortaya koymuştur. Çan volkanitlerini etkileyen asit-sülfat karakterli hidrotermal akışkanlar, fay zonları boyunca K-feldispat ve plajiyoklazı düşük pH (~2-3) koşullarında altere etmiştir (Aydın, 2014). Bu süreçte feldispat ve mikanın hidrolizi element mobilizasyonuna yol açmış, yatakların jeokimyasal evriminde Ba ve Sr içeriklerinde göreceli zenginleşmeler gözlenmiştir (Ünal Ercan vd., 2022a). Aynı çalışmada, aynı ana kayaç ve aynı fay zonu üzerinde birbirine yakın konumlanan bu üç yatağın farklı kökenlerden geliştiği belirlenmiştir: Bahadırılı ve Çaltıkara hipojen kökenliken, Duman yatağı gölsel süreçler ve meteorik su karışımıyla süperjen etkiler altında şekillenmiştir (Ünal Ercan vd., 2022a).

Farklı genetik süreçlerle oluşan kaolin yataklarının ekonomik değeri, mineralin geniş endüstriyel kullanım çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Kaolin; kâğıt sanayisinde dolgu ve kaplama pigmenti, seramik ve refrakter sanayisinde ana hammadde, kauçuk ve plastik sanayisinde dolgu maddesi, boya ve kaplama sanayisinde ise opaklık, parlaklık ve akışkanlık kazandıran fonksiyonel bir bileşen olarak

kullanılmaktadır (Murray, 2007; Buyondo vd., 2022). Kalsinasyon yoluyla metakaoline dönüştürüldüğünde çimentoda yüksek puzolanik aktivite kaynağı (Murray, 2007), jeopolimer üretiminde ise önemli bir hammadde potansiyeli taşımaktadır (Cheng vd., 2019). Kaolin, biyomedikal alanda yara iyileştirici kompozitlerin bağlayıcı/dolgu bileşeni olarak, yüzeyi metoksi ile modifiye edilmiş formları ise ilaç taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesinde değerlendirilmektedir. Kenar yüzeylerindeki reaktif hidroksil gruplarından kaynaklanan yüksek adsorpsiyon kapasitesi sayesinde ayrıca sentetik boya, ağır metal ve radyoaktif element giderimiyle atık su arıtımında etkin bir adsorban olarak da kullanılmaktadır (Cheng vd., 2019). Bu çok yönlü kullanım alanları, bölgedeki kaolin yataklarının yalnızca jeolojik-genetik açıdan değil, madencilik ve sanayi hammaddesi potansiyeli açısından da önemini göstermektedir.

Bölgedeki magmatizma ve buna bağlı hidrotermal aktivite, genişlemeli tektonik rejim tarafından kontrol edilmektedir. Silis bakımından zengin akışkanların yükselimi, D-B ve KD-GB doğrultulu ana fay sistemleri ile bunlara dik gelişen KB-GD doğrultulu ikincil kırık sistemleri boyunca gerçekleşmektedir (Ünal Ercan ve Ece, 2015; Ünal Ercan vd., 2022b). **Sileks**, yüksek silis içeriği (> %95) sayesinde atmosferik etkilere karşı yüksek fiziksel ve kimyasal direnç göstermekte ve sahada sarp sırtlar, tepeler şeklinde belirgin bir topoğrafya oluşturmaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Bölgedeki bu morfolojinin en tipik örneği, Karalıca jeotermal alanının kuzeyindeki Hamamtepe ve batısındaki Muratlar sileks yataklarıdır. Bu iki sahadaki sileks oluşumlarının iki aşamalı bir hidrotermal süreç sonucunda geliştiği düşünülmektedir: erken evrede asit-sülfat karakterli akışkanlar kaolinit-alünit-halloysit alterasyonunu oluşturmuş, bunu izleyen geç evrede ise nötre yakın pH'lı alkali-klorür akışkanlar silika sinter ve silisleşmiş volkanik kayaç fasiyesleri şeklinde çökelmiştir (Yılğör, 2001; Ünal Ercan vd., 2022b).

Ünal Ercan ve Ece (2015), Hamamtepe'den aldıkları sileks örneklerinin α -kuvars fazında olduğunu, fay zonlarına yakın kesimlerde ise kaolinit ve alünit mineralleri geliştiğini ortaya koymuş; alünitlerde yapılan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaş tayinleri mineralizasyonun 28-32 My aralığında geliştiğini belirtmiştir. Ünal Ercan vd. (2022b), aynı sahalardaki sinter oluşumlarını izotopik ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$) verilerle inceleyerek sistemin sığ (<150 m) kesimindeki buhar-ısıtmalı asit-sülfat alterasyonunun derinde gelişen bir LS epitermal sistemi örtüğünü ve sinterlerin kendisinin Au içermediğini, buna karşın ilişkili altere zonlarda (özellikle Muratlar'da) yerel olarak ~1 ppm'e varan Au zenginleşmeleri bulunduğunu saptamıştır. Aynı çalışmada, elde edilen $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaş verileriyle bölgedeki alterasyonun üç ayrı dönemde (Muratlar: 22,6-32,4 My; Hamamtepe kuzey: 12,3-15,2 My; Hamamtepe güney: 5-7 My) geliştiği belirlenmiştir.

Sileks, seramik öğütme değirmenlerinde bilye ve astar taşı olarak kullanılan önemli bir hammadde niteliği taşımaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Biga Yarımadası'ndaki silekslerin büyük bölümü tarihsel olarak işletilmiş, buna karşın bu alterasyon zonlarının epitermal Au-Cu potansiyeli ancak Ağı Dağı gibi sistemlerin keşfinden sonra fark edilmeye başlanmıştır (Yiğit, 2012). Günümüzde Etili çevresindeki ocaklarda sürdürülen üretim faaliyetleri, hem bölgenin jeolojik mirasını görünür kılmakta hem de endüstriyel bir kaynak olarak yerel ekonomiye katma değer sağlamaktadır.

Çan ve çevresindeki arkeolojik araştırmalar, bölgedeki sileks yataklarının Paleolitik Çağ'dan itibaren alet ve silah üretiminde hammadde olarak kullanıldığını ve ilk insanların yerleşim kararlarını etkilediğini göstermektedir (Atabay ve Körpe, 2019). Nitekim bölgenin ilk insan toplulukları tarafından bu denli tercih edilmesinde, hammadde bolluğunun (Özer vd., 2018), çevredeki sulak alanların sağladığı ekolojik çeşitliliğin ve jeotermal kaynakların sunduğu ısınma avantajının ortak rol

oynadığı öne sürülmektedir (Atabay ve Körpe, 2019). Bu bağlamda, Bahadırköyü yakınlarında yer alan İnkaya Mağarası (Şekil 7a), in-situ dolgu tabakaları ve çevresinde tespit edilen binlerce yontma taş alet kalıntısıyla, Batı Anadolu'daki fosil insan varlığına ışık tutacak önemli merkezlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Özer vd., 2018). Bu sahada yürütülen insansız hava aracı (İHA) tabanlı yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve modelleme çalışmalarıyla (Yücel vd., 2024, Şekil 7b), mağara çevresindeki sileks yüzleklerinin KD-GB doğrultusunda yaklaşık 150×30 m'lik bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Orta Paleolitik döneme tarihlenen bu yontma taş endüstrisi, doğrudan antropolojik bir veri içermese de dönem itibarıyla Avrupa, Orta Doğu ve Batı Asya'da yaygın olarak bilinen Neandertaller ile ilişkilendirilebilecek bir iskân/sığınak alanına işaret etmektedir; bölgedeki açık alan buluntu yerleri ise hammadde işleme ve alet üretim alanları olarak değerlendirilmektedir (Özer vd. 2018).

Bölgenin endüstriyel hammadde kaynaklarından biri olan **kalker**, Çan ve çevresindeki temel kayaçlar içerisinde geniş bir yayılım sunmaktadır. İl Özel İdaresi verileri ve saha gözlemleriyle kalkerlerin Terzialan, Bardakçılar, Derenti, Yaykın, Okçular, Asmalı ve Çomaklı köyleri çevresindeki sahalarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Açık ocak olarak işletilen bu yataklar, bölge madenciliğinin önemli bir kolunu oluşturmaktadır. Agregat üretimi ve termik santrallere hammadde temini başta olmak üzere yapı ve enerji sektörünün çeşitli girdilerinin karşılanmasında kullanılan bu sahaların, bölgedeki üretim ve tüketim noktalarına yakınlığı da hammadde nakliyesinde lojistik avantaj sağlamaktadır. Yaykın köyündeki kalker ocağında, ortalama %55 CaO (~%98 CaCO₃ eşdeğeri) içerikli kalker yıllık 50.000 t kapasiteyle üretilmekte; üretilen malzeme inşaat sektörünün yanı sıra termik santrallere hammadde olarak sunulmaktadır (Çınar ve Şanlıyüksel Yücel, 2025).



Şekil 7. a) İnkaya Mağarası ana bölümünden görünüm. b) İnkaya Mağarası düşey ortofotosu (Yücel vd., 2024).

Figure 7. a) View from the main section of İnkaya Cave. **b)** Vertical view of İnkaya Cave on the orthophoto (Yücel et al., 2024).

Aynı çalışmada, Asmalı köyünde bulunan kalker ocağında, yıllık 450.000 t kapasiteyle üretilen kalkerin tamamının hammadde olarak termik santrale sağlandığı belirtilmiştir.

Çan formasyonunun orta-üst seviyelerinde, kilitaşı-tüfit ardalanması arasında mercekler halinde **diyatomit** düzeyleri gözlenmektedir. Diyatomit adı verilen tek hücreli mikroskobik alglerin amorf silis bileşimindeki kabukları (kavkı), organizmaların ölümünün ardından deniz ve göl ortamlarında birikip istiflenerek zamanla ekonomik değer taşıyan diyatomit yataklarını oluşturur (Çetin ve Taş, 2012). Yüksek gözenekliliği, geniş yüzey alanı ve refrakter özelliği sayesinde diyatomit; filtre yardımcı malzemesi, dolgu maddesi, ısı ve ses yalıtım malzemesi ve hafif yapı malzemesi gibi geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahip bir hammadde (Flower ve Williams, 2025). USGS (2026b) verilerine göre Türkiye, 2025 yılında dünya diyatomit üretiminde %6'lık payı ile (150 bin ton/yıl) küresel ölçekte 5. sırada yer almaktadır ve yaklaşık 44 milyon tonluk önemli bir rezerve sahiptir. Bölgesel ölçekte, Keçiagılı köyü çevresindeki diyatomitler, tüfler içerisinde 50-60 cm'ye ulaşabilen, yer yer 20-30 cm kalınlıkta tabakalar halinde bulunmaktadır (Borat,

1992); ancak düşük kalitesi ve az rezervi nedeniyle işletilmediği bildirilmiştir (Ertin, 2001). Benzer oluşumların Çan ilçe merkezi yakınlarındaki Cemiyet alanı mevkinde de varlığı bildirilmiştir (Erdoğan vd., 2012). Türkiye'nin küresel ölçekteki bu üretim gücü dikkate alındığında; havzadaki potansiyelin nanoteknoloji, tıp ve enerji sektörü gibi yüksek katma değerli alanlar özelinde güncel jeokimyasal analizlerle yeniden değerlendirilmesi, bölgesel kalkınma vizyonu açısından önem taşımaktadır.

Hidrotermal alterasyon süreçlerinde, fay ve çatlak zonları boyunca yükselen hidrotermal akışkan ve gazların etkisiyle sülfür mineralleri (özellikle pirit) oksidasyona uğramaktadır. Bu jeokimyasal süreç, Çan volkanitleri içerisinde yer alan riolitik tüflerde yoğun limonitleşme gelişimine neden olarak kayaç yüzeylerinde karakteristik haleli ve desenli görünümler oluşturmaktadır (Akdaş vd., 2001). Bu çok renkli tüfler yerel literatürde **Çan taşı**, ticari piyasada ise "Rainbow" adıyla tanınmaktadır. Tüflerin kuru birim hacim ağırlığına göre geçiş sınıfı yapı malzemesi niteliği taşıdığı saptanmıştır (Akdaş vd., 2001). Çan taşı, kolay işlenebilirliği ve yüksek ısıl direnci sayesinde mühendislik projelerinde

stratejik avantajlar sunmaktadır; iç ve dış cephe kaplamalarından peyzaj düzenlemelerine, şömine uygulamalarından hediyelik eşya üretimine kadar geniş bir mimari ve dekoratif uygulama çeşitliliğine sahiptir (Tekin, 2009). Tarihsel olarak Söğütalan, Çakıl, Halılağa, Uzunalan, Göle, Bilaller ve Dereoba köyleri çevresinde üretim faaliyetleri yoğunlaşmıştır (Akdaş vd., 2001). Günümüzde üretim, büyük ölçüde Çakıl köyündeki ocakta sürdürülmekte ve çıkarılan hammadde Karakoca köyündeki tesiste işlenmektedir (Çınar ve Şanlıyüksel Yücel, 2025).

Çan, volkanizma ve aktif tektonizmanın şekillendirdiği endüstriyel hammadde çeşitliliğinin yanı sıra, Batı Anadolu'nun önemli enerji koridorlarından birini oluşturmaktadır. Jeotermal kaynakların sunduğu enerji potansiyeli, havzadaki yüksek ısı akısı ve tektonik aktivitenin güncel bir yansımasıdır. Havzanın enerji portföyü, yalnızca jeotermal kaynaklarla sınırlı değildir. Neojen dönemindeki çökme süreçlerinin ve organik madde birikiminin bir ürünü olan linyit rezervleri bölgenin endüstriyel kimliğini tarihsel ve ekonomik açıdan belirleyen temel enerji bileşenidir.

Enerji Hammaddesi Potansiyeli

Çan linyit havzası, yaklaşık 92,5 milyon tonluk toplam rezerviyle Biga Yarımadası'nın en önemli enerji hammadde kaynaklarından birini oluşturmaktadır (MTA, 2026). Kuzeydoğuda Helvacı köyü ile güneybatıda Hacıkasım köyü arasında uzanan havza, yaklaşık 30 km uzunluğa ve 10 km genişliğe sahiptir (Wedding, 1966). Çan formasyonu içerisinde yer alan linyit damarları başta Çan ilçe merkezi olmak üzere, Durali, Karlı, Kulfa, Yaya, Etili, Hacıkasım, Yeniçeri, Helvacı ve Çomaklı köyleri çevresinde geniş yüzlekler vermektedir. 1940 yılında keşfedilen havza, 1979 yılına kadar özel sektör tarafından işletilmiş, bu tarihten itibaren üretim faaliyetleri TKİ ÇLİ tarafından yürütülmeye başlanmıştır (ÇLİ, 2026).

Günümüzde linyit üretimi, TKİ ve özel sektör tarafından yürütülen açık ocak madenciliği faaliyetleri kapsamında sürdürülmekte ve başta enerji üretimi olmak üzere farklı kullanım alanları için ekonomiye kazandırılmaktadır.

Linyitlerin çevresel ve ekonomik değerlendirmesini belirleyen en temel unsurlardan biri, onların mineralojik ve jeokimyasal karakterizasyonudur. Çan linyitlerinin başlıca mineral bileşenlerini kaolinit, kuvars, jips, pirit, opal-CT, kristobalit, plajiyoklaz ve K-feldispat oluşturmaktadır (Tuncalı vd., 2002; Gürdal, 2011; Şanlıyüksel Yücel, 2019). Kömürün mineral fazında baskın olarak bulunan pirit, yalnızca kükürt kaynağı değil, aynı zamanda iz elementlerin başlıca taşıyıcısıdır. Kömürdeki pirit oranı ile As konsantrasyonu arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır (Ünalan, 2013). Çan linyitlerinde belirlenen ortalama As içeriği 253,5 mg/kg (Baba vd., 2016) olarak saptanmış olup, bu değer Ketris ve Yudovich (2009) tarafından belirtilen dünya kömür ortalamasının (8,3 mg/kg) yaklaşık 30 kat üzerindedir. Şanlıyüksel Yücel (2019), Etili ve Çomaklı kömür sahalarındaki As (33,1-75,7 mg/kg), Cu (44,3-48,6 mg/kg), Zn (57-74 mg/kg), Pb (18,7-27,3 mg/kg), Mn (77-232 mg/kg) ve Ni (9,9-18,5 mg/kg) içeriklerinin hem Türkiye (Palmer vd., 2004) hem de dünya kömür ortalamalarından (Swaine, 1990) belirgin biçimde yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Etili, Karlı, Yeniçeri ve Çomaklı sahalarından alınan örneklerin alt ısı değerleri sırasıyla 3628 kcal/kg, 4264 kcal/kg, 4028 kcal/kg ve 2537 kcal/kg olarak belirlenmiştir (Tuncalı vd., 2002). Çan havzası linyitlerinin nem ve kül içeriği, sırasıyla ağırlıkça %8,76-32,56 ve %2,46-38,48 arasındadır (Gürdal, 2011). Linyitlerin ayırt edici jeokimyasal özelliği, oluşum süreçlerinde etkili olan volkanik aktivite ile ilişkili yüksek toplam kükürt içeriğidir. Tuncalı vd. (2002), bu değer %1,63 ile %5,98 arasında değiştiğini ortaya koymuş; Gürdal (2011) ise %0,21 ile %14,36 gibi oldukça geniş bir aralık bildirerek, en yüksek toplam kükürt içeriklerini

Etili, Yaya ve Çomaklı sahalarında saptamıştır. Bu içerik, kömürün evsel ısınmada doğrudan kullanılmasını sınırlamakta ve enerji üretiminde uygun yanma teknolojilerinin seçimini belirleyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bu teknolojik gereklilikler doğrultusunda seçilen uygun yakma sistemleri, Çan linyitlerinin enerji üretiminde etkin biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yerli linyit kaynaklı elektrik üretimi, Türkiye'nin enerji arz güvenliği ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından önem taşımaktadır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yayımlanan 2024 yılı istatistiklerine göre yerli linyit kaynaklı kurulu güç 10.106,5 MW olup, toplam kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımında %8,69'luk bir paya sahiptir (TEİAŞ, 2025). Türkiye'de işletmede olan kömür yakıtlı termik santraller içerisinde Çan ilçesi, iki önemli enerji tesisine ev sahipliği yapmaktadır. Toplam 650 MW kurulu güce sahip termik santraller, bölgedeki enerji üretim kapasitesinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bölgede 2006 yılında, Türkiye'nin akışkan yataklı yakma teknolojisine sahip ilk santrali faaliyete geçmiştir. Tesis, yüksek kükürtlü linyitlerin çevresel standartlara uygun yakılması amacıyla tasarlanmıştır. Tesiste ekonomik geri kazanımı henüz yaygınlaşmayan küller, tesisin yaklaşık 1 km kuzeydoğusunda yer alan vadi tipi depolama alanında düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmektedir. 2018 yılında işletmeye alınan diğer santral, kritik altı pulverize yakma teknolojisiyle çalışmaktadır. Bu tesiste, yanma verimliliğini artırmak ve emisyon limitlerini optimize etmek amacıyla Çan, Malkara ve Soma havzalarından temin edilen linyitler belirli oranlarda harmanlanarak (paçal) kullanılmaktadır.

Her iki santralin linyit ocaklarına olan coğrafi yakınlığı, havza madenciliğinin merkezi bir planlama anlayışıyla yürütülmesine olanak sağlamakta ve nakliye maliyetlerini azaltarak lojistik süreçlerin optimizasyonuna katkı

sunmaktadır. Çan linyit havzası, mevcut rezervlerin uygun yakma teknolojileriyle entegrasyonu sayesinde yerel enerji üretiminde sürekliliği sağlarken, aynı zamanda çevresel yönetim süreçlerinin ve emisyon kontrolünün teknik bir gereklilik olduğu bir hammadde sahasıdır.

ÇAN ve ÇEVRESİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAK ve ENERJİ YÖNETİMİ

Sürdürülebilir kalkınma, doğal kaynakların korunmasını, ekonomik büyümenin sürekliliğini ve toplumsal refahın artırılmasını eş zamanlı hedefleyen bütüncül bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır (UN, 2015). Çevresel, ekonomik ve sosyal boyutların dengeli yönetimini gerektiren bu yaklaşım; kaynak etkinliği, enerji arz güvenliği ve çevresel risklerin azaltılması gibi stratejik unsurları kapsamaktadır (Mancini ve Sala, 2018). Özellikle enerji ve madencilik gibi kaynak yoğun sektörlerde bu ilkelerin hayata geçirilmesi; operasyonel süreçlerin ekosistem dengesi gözetilerek planlanmasını ve uzun vadeli projeksiyonlar doğrultusunda yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Sürdürülebilirlik ilkelerinin operasyonel düzeyde uygulanmasını sağlayan başlıca araçlardan biri akıllı madenciliktir. Yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), otomasyon ve veri analitiği gibi ileri teknolojilerin bütünleşmesine dayanan bu dijital dönüşüm yaklaşımı, madencilik faaliyetlerinde verimlilik, iş güvenliği ve çevresel performansı artırmayı amaçlamaktadır (Choi, 2023). Bu entegrasyon sayesinde geleneksel madencilik uygulamaları veri odaklı sistemlere evrilmekte, karar verme süreçleri hızlanmakta ve faaliyetler daha şeffaf, izlenebilir ve etkin biçimde yönetilebilmektedir.

Jeolojik açıdan karmaşık ve ekolojik hassasiyeti yüksek Çan ilçesi ve çevresi gibi bölgeler, sürekli ve yüksek çözünürlüklü bir takibi gerektirmekte; bu da dijital dönüşüm araçlarının etkinliğini daha da belirgin kılmaktadır. İHA

destekli yüksek çözünürlüklü haritalama, CBS tabanlı üç boyutlu modelleme ve gerçek zamanlı çevresel izleme yöntemleri bu kapsamda tercih edilen uygulamalardır. Söz konusu yöntemlerin veri hassasiyetinin artırılmasına, olası çevresel etkilerin izlenmesine ve iş sağlığı ve güvenliği standartlarının uygulanmasına katkı sağladığı görülmektedir. Bu çerçevede bölüm, Çan ilçesini çevresel, ekonomik, sosyal ve enerji sürdürülebilirliği boyutlarıyla ele almaktadır.

Çevresel Sürdürülebilirlik: Asit kaya/meden Drenajı Yönetimi ve Rehabilitasyon

Madencilik faaliyetlerinden bağımsız, yüzeye yakın sülfürlü jeolojik birimlerin atmosferik koşullara maruz kalarak doğal oksidasyonla suyun pH değerini düşürmesi, asit kaya drenajı (AKD) olarak tanımlanmaktadır (Karadeniz, 2008). Buna karşılık, asit maden drenajı (AMD) ise madencilik faaliyetleri neticesinde pirit vb. sülfürlü mineralleri içeren kayaların yüzey alanının genişleyerek oksijen, su ve mikroorganizmalara (*Acidithiobacillus ferrooxidans* vb.) maruz kalmasıyla oksidasyon süreçlerinin hızlanması sonucu ortaya çıkan, düşük kaliteli drenaj oluşumuyla karakterize kompleks bir biyojeokimyasal süreçtir (Şanlıyüksel Yücel vd., 2016).

Çan, hidrotermal alterasyona uğramış volkanik kayaların oksidasyonundan kaynaklanan AKD ile linyit madenciliği faaliyetleri sonucu gelişen AMD sorunlarının eş zamanlı olarak gözlemlendiği bölgelerden biridir. Şanlıyüksel Yücel (2013) tarafından, ilçenin Muratlar, Halılağa, Keçiağılı, Hacıkasım ve Hacıbekirler köylerini kapsayan sahada yürütülen hidrojeokimyasal çalışmalarda, su kaynaklarının pH değerinin 3,47 ile 7,47 (ortalama 4,96) arasında değiştiği, EC değerinin 2840 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ 'ye ve As içeriğinin 92,9 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'ye kadar yükseldiği saptanmıştır. Bölgedeki benzer bulgular diğer çalışmalarda da desteklenmektedir: Şengüenalp (2009), Tepeköy'de örnekleme

yaptığı su kaynağının As konsantrasyonunu 45,6 $\mu\text{g}/\text{l}$ olarak raporlamıştır. Baba vd. (2012) ise Muratlar'da alterasyon zonlarından alınan kayaç örneklerinde 735,7 mg/kg As içeriği tespit etmiş; yüksek konsantrasyonun ana kaynağı olarak arsenopirit (FeAsS), realgar (AsS) ve orpiment (As_2S_3) minerallerine işaret ederek, bu birimlerle etkileşimli sondaj sularında As içeriğinin 150 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'ye ulaştığını bildirmiştir. Arsenik, Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC, 2012) tarafından kanserojen olarak sınıflandırılmıştır; içme sularında bulunması durumunda uzun dönemde önemli sağlık riskleri oluşturabilmektedir. Bu doğrultuda, yönetmeliklerde (İTASHY, 2016; WHO, 2022) önerilen As limit değerinin (10 $\mu\text{g}/\text{l}$) belirgin biçimde üzerinde olan kaynakların içme suyu olarak kullanılmaması ve su kalitesinin düzenli olarak izlenmesi önem taşımaktadır.

İşletme faaliyetleri sona eren Çan'daki bazı kömür sahalarında rehabilitasyon süreçlerinin uygulanmadığı saptanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2013). Açık işletme yöntemiyle bozulan topografik yapıda oluşan derin çukurluklar, zamanla yüzeysel drenaj ve yer altı sularının sızmasıyla dolmuştur. Sahada yüzlek veren kömür damarları, altere volkanik kayaçlar ve pasalar içerisindeki sülfür minerallerinin oksidasyonu, ortamda asidi nötrleştirici minerallerin bulunmaması, bakteri faaliyetleri ve coğrafi etmenler gibi birçok faktör sonucunda sahada asit maden gölleri oluşmuştur (Şanlıyüksel Yücel, 2013; Şanlıyüksel Yücel vd., 2016). Etili kömür sahasında bulunan 9 adet asit maden gölü, bölgeyi Türkiye'de bu oluşumların bilinen en yoğun sahalarından biri konumuna getirmektedir (Şanlıyüksel Yücel vd., 2014). Bu göllerde düşük pH değeri (3,09) ile yüksek SO_4^{2-} (4740 mg/l) ve metal (Fe: 389 mg/l, Al: 321 mg/l, Mn: 165 mg/l, Zn: 10 mg/l ve Ni: 2 mg/l) konsantrasyonu saptanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017). Asit maden drenajı/gölleri, yakın ve uzak çevresinde yer alan alıcı ortamlar üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı olarak çok boyutlu çevre sorunlarına yol açmaktadır.

Bu nedenle, Çan'daki AMD kaynaklı çevresel risklerin izlenmesi ve azaltılması amacıyla farklı yöntemler araştırılmıştır.

Şanlıyüksel Yücel ve Yücel (2017), İHA (hexacopter) kullanarak Etili ve Çomaklı kömür ocaklarındaki maden göllerine ait yüksek çözünürlüklü (1-6 cm) ortofotolar üretmiş ve *Structure from Motion* tekniği ile sahanın üç boyutlu modellerini oluşturmuştur. CORS istasyon ağına bağlı RTK-GNSS ölçümleri ile koordinatları belirlenen yer kontrol noktaları sayesinde yüksek konumsal doğruluk elde edilen çalışmada, maden göllerinin toplam alanı Etili sahasında 13,2 ha, Çomaklı sahasında ise 16,7 ha olarak hesaplanmıştır. Çalışma, İHA teknolojisinin sunduğu düşük maliyetli ve hızlı veri üretim kapasitesinin, antropojenik etkilerle dinamik değişim gösteren maden sahalarının morfolojik gelişimini izlemede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

İleri ve Şanlıyüksel Yücel (2020) tarafından, Etili kömür ocağındaki asit maden gölünden alınan su örneklerinin arıtımında uçucu küllerin etkinliği laboratuvar ölçekli kesikli (batch) testlerle incelenmiştir. Çalışmada, uçucu külün özgül yüzey alanını ve dolayısıyla metal adsorpsiyon kapasitesini artırmak amacıyla, 20 kHz'lik bir ultrasonik prob ve 40 kHz'lik bir ultrasonik banyo kullanılarak gerçekleştirilen ultrases destekli modifikasyon uygulanmıştır. Metal giderimi için optimum koşulların belirlenmesi sürecinde ultrasonik frekans, adsorban dozu, temas süresi, pH ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip modifiye uçucu küllerin kullanımı, AMD kaynaklı metal kirliliğinin (Fe, Al, Zn, Co, Ni ve Cu) gideriminde ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Modifiye uçucu kül/AMD oranının 1:10, temas süresinin 120 dk ve başlangıç pH'nın 5 olduğu koşullarda, metal konsantrasyonlarının Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015) tarafından belirlenen deşarj limitlerinin altına düşürüldüğü tespit edilmiştir.

Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2020) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, Etili kömür ocağında AMD oluşumuna neden olan pasalar ile uçucu küllerin uygun koşullarda karıştırılmasının, çevresel risklerin azaltılması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Jeokimyasal analizler ve asit-baz hesaplama testleri sonucunda, pasaların asit üretim potansiyelinin etkin bir şekilde sınırlandırılması için ağırlıkça en az %30 oranında uçucu kül ile karıştırılması gerektiği saptanmıştır. Belirlenen optimum karışım oranına göre gerçekleştirilen liç testleri sonucunda, sızıntı suyunun pH değerinin yükseldiği; buna karşın EC, sülfat ve metal (Al, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn) konsantrasyonlarının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Deneylerin 24. saatinden itibaren sızıntı suyundaki metal konsantrasyonlarının Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015) tarafından belirlenen limit değerlerinin altına düştüğü ve 720 saatlik izleme periyodu boyunca bu kararlı yapının korunduğu belirlenmiştir. Uçucu külün içerdiği yüksek CaO, asiditeyi nötralize edip pH değerini yükseltirken, sahip olduğu ince taneli yapı, sülfürlü minerallerin yüzeylerini kaplayarak oksidasyon süreçlerini fiziksel bir bariyerle sınırlandırmaktadır. Laboratuvar ölçekli bu bulgular, atıkların birlikte değerlendirilmesine dayalı ekonomik ve sürdürülebilir rehabilitasyon yaklaşımlarının bölgedeki çevre sorunlarının çözümünde uygulanabilir olduğuna işaret etmektedir. Yöntemin sahadaki uzun süreli etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak amacıyla pilot ölçekli saha uygulamalarının gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Bölgede madencilik faaliyetleri kaynaklı AMD'ye ek olarak, jeotermal sistemlerde de benzer olası bir sülfat kökeni belirsizliği söz konusudur. Deniz (2010) tarafından jeotermal alanların yakın çevresindeki alterasyon zonlarında saptanan jarosit (Alibeyçiftliği), kaolinit (Karalıca) ve illit/halloysit (Bardakçılar) gibi mineralojik bulgular, bölgedeki jeotermal kaynaklardaki sülfat baskınlığının büyük ölçüde

derin/paleo-hidrotermal alterasyon sürecinden kaynaklandığını göstermektedir. Benzer şekilde, Çan'ın batısında 250 m derinliğe kadar incelenen örneklerdeki bol miktardaki piritin asit-sülfat tipi hidrotermal alterasyon süreçleriyle oluştuğu belirlenmiştir (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007). Nitekim Karalıda ile Tepeköy arasında yer alan Hamamtepe sileks ocağında, birbirine yakın iki ocaktan (H1, H2) alınan alümit örnekleri farklı $\delta^{34}\text{S}$ değerleri vermiştir: H1'de -2,7/-3,3‰ (magmatik-hidrotermal), H2'de -19,6‰ (mikrobiyal/sedimanter köken; Ünal Ercan vd., 2022b). Karalıda jeotermal kaynağının pH (6,56) ile Fe (350 µg/l), As (100 µg/l), Mn (600 µg/l) ve SO_4^{2-} (1020 mg/l) içerikleri (Çizelge 2); asit maden gölündeki kuvvetli asidik ve yüksek metal yüklü karakterden (pH: 3,09; Fe: 389.567 µg/l; As: 12 µg/l; Mn: 165.520 µg/l; SO_4^{2-} : 4.740 mg/l; Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017) oldukça farklıdır. Jeotermal kaynağın nötre yakın pH'ı ile düşük Fe ve Mn içeriğine karşın yüksek As içermesi, jeokimyasının AKD/AMD olası etkileşiminden ziyade hidrotermal minerallerle (arsenopirit, realgar, orpiment; Baba vd., 2012) ilişkili derin kökenli bir zenginleşmeyle daha uyumlu olduğuna işaret etmektedir. Jeotermal kaynaklardaki sülfat kaynağının belirlenmesinde tek başına $\delta^{34}\text{S}$ - SO_4^{2-} yeterli olmayabilir. Hamamtepe H1/H2 örneğinde görüldüğü gibi, birbirine yakın konumlarda dahi çok farklı $\delta^{34}\text{S}$ imzalarına sahip birden fazla olası kükürt kaynağı bulunmaktadır. Pirit oksidasyonu sırasında kükürt izotop fraksiyonlanmasının ihmal edilebilir düzeyde olması ve üretilen sülfatın kaynak piritin $\delta^{34}\text{S}$ imzasını büyük ölçüde koruması (Şanlıyüksel Yücel vd., 2016), ölçülen değerlerin doğru kaynağa atfedilmesini kolaylaştırır da hangi kaynağın baskın olduğunu tek başına belirlemeye yetmez. Bu nedenle, $\delta^{18}\text{O}$ - SO_4^{2-} ile $\delta^{18}\text{O}$ - H_2O arasındaki kütle dengesi ilişkisinin, Fe(II)/Fe(III) oranı gibi tamamlayıcı jeokimyasal göstergelerle birlikte değerlendirildiği çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

Bu teknolojik ve jeokimyasal çözüm önerilerine ek olarak, bölgedeki maden sahalarının rehabilitasyonu, işletmenin çevresel ayak izini kalıcı olarak azaltmayı hedefleyen bölgesel çevre yönetimi yaklaşımının önemli bir bileşenidir. Bu doğrultuda, TKİ ÇLİ bünyesindeki kömür ocaklarında 1991-2023 yılları arasında gerçekleştirilen dekapaj ve üretim faaliyetleri sonucunda bozulan topoğrafyanın iyileştirilmesi amacıyla, toplam 1.335 ha alanda 1.917.088 adet fidan dikimi gerçekleştirilmiştir. Bölgenin ekolojik koşullarına uygun olarak yapılan ağaçlandırma çalışmalarında kızılçam, akasya ve fıstıkçanı gibi ağaç türlerinin yanı sıra sarısalkım ve lavanta gibi bitki türleri de tercih edilmiştir (TKİ, 2026). Bu rehabilitasyon uygulamalarının toprak stabilitesini artırdığı, yüzey akışı ile erozyon süreçlerini sınırladığı ve AMD oluşum riskini azalttığı değerlendirilmektedir.

Ekonomik ve Sosyal Sürdürülebilirlik

Çanakkale İl Özel İdaresinin 2024 yılı verilerine göre, Çan ilçesinde toplam 38 adet aktif maden ruhsatı bulunmaktadır. Bölgedeki madencilik faaliyetleri; kalker ve taş ocakçılığının yanı sıra linyit odaklı enerji üretimini, seramik sanayisinin temel girdisi olan endüstriyel hammaddelerin çıkarımını ve metalik maden işletmeciliğini kapsamaktadır. Bölge ekonomisinin temel bileşenlerinden biri olan bu sektör, Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) 2024 yılı verilerine göre ilçede (büyük çoğunluğu özel sektörde olmak üzere) 6.937 kişiye istihdam sağlamaktadır. Sektörün yarattığı bu etki yalnızca doğrudan istihdamla sınırlı kalmamakta, yerel nüfusun gelir düzeyini ve tüketim yapısını belirleyerek bölgesel ekonomik canlılığı tetikleyen ana unsur olarak öne çıkmaktadır.

Sektördeki iş gücünün demografik yapısı incelendiğinde, toplam çalışanların %3,53'ünü (245 kişi) kadınların oluşturması, sektörün büyük ölçüde erkek iş gücüne dayalı olduğunu ortaya

koymaktadır. Küresel madencilik sektöründe kadın çalışan oranının %10 ile %15 arasında değiştiği (Bansal vd., 2024) göz önüne alındığında, yerel verilerin küresel ortalamanın oldukça altında kaldığı görülmektedir. Madencilik sektörünün otomasyon ve dijitalleşme ile dönüştüğü bu süreçte, kadınların bilim, teknoloji, mühendislik ve matematik (STEM) alanındaki düşük temsiliyeti kariyer ilerlemesinin önündeki büyük engellerden biri olarak tanımlanmaktadır (IGF, 2023; Ackah-Baidoo, 2025). Bu tablo, sosyal sürdürülebilirlik kapsamında sadece farkındalık artırmanın ötesinde teknik kapasiteyi geliştirecek ve kadın istihdamını tedarik zincirinin her aşamasında teşvik edecek yapısal dönüşümlere duyulan ihtiyaca işaret etmektedir.

Demografik tabloyu tamamlayacak şekilde, ilçenin genel nüfus verileri de sektörel bağımlılığın boyutunu ortaya koymaktadır. Çan ilçesinin 2024 yılı toplam nüfusu 46.920 kişidir (TÜİK, 2025). İlçede doğrudan madencilik sektöründe çalışan nüfus, toplam nüfusun %14,8'ini oluşturmaktadır. Aktif çalışma çağındaki (15-64 yaş) nüfus baz alındığında, bu istihdam oranının %20-25 aralığına yaklaşabileceği tahmin edilmektedir. Sektörün yarattığı doğrudan istihdamın yerel hizmet ve tedarik sektörleri üzerindeki çarpan etkisi (World Bank, 2025), bölgede çok daha geniş bir istihdam ekosistemi ve ekonomik canlılık oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Bu göstergeler, Çan ekonomisinin madencilik faaliyetlerine yönelik yüksek düzeyde sektörel bağımlılığını ortaya koyarken, bu sektörün bölgesel sürdürülebilirlik açısından önemli bir role sahip olduğuna işaret etmektedir.

Ancak tek bir sektöre olan bu yüksek bağımlılık, rezerv tükenmesi, emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar veya sınırda karbon düzenleme mekanizması gibi küresel faktörler karşısında sosyal kırılganlık riskini artırmaktadır. Çan ilçesinde madencilik faaliyetlerinin uzun vadede sürdürülebilirliğinin sağlanması; iş gücü çeşitliliğinin artırılması, kadın istihdamını

teşvik eden mesleki eğitim programlarının yaygınlaştırılması ve madencilik gelirlerinin bölgesel kalkınma projelerine yönlendirilmesi gibi stratejilere bağlıdır. Bu tür yaklaşımlar, sektörün yalnızca ekonomik büyüme sağlayan bir alan olmasının ötesinde, yerel toplulukların sosyal dayanıklılığını güçlendiren bir kalkınma aracına dönüşmesine katkı sağlayabilir.

Bu stratejilerden bir diğeri işletme ömrünü tamamlamış maden sahalarının rehabilitasyon süreçlerinin jeoturizm ve jeomiras temelli arazi kullanım yaklaşımlarıyla ele alınmasıdır. Maden turizmi, jeoturizm ve endüstriyel turizmle ilişkili, hızla gelişen bir turizm alt sektörü olarak tanımlanmaktadır (Rybár ve Hronček, 2017; Jelen, 2018). Rehabilit edilen maden sahalarının rekreasyon ve eğitim alanlarına dönüştürülmesi, madencilik faaliyetlerinin sona ermesiyle oluşabilecek sosyo-ekonomik daralma riski taşıyan bölgeler için yeni bir dönüşüm fırsatı sunmaktadır. Sahaların, uzun dönemli jeokimyasal stabilitenin izlendiği çevresel gözlem alanları olarak planlanması, bölgenin hem bilimsel araştırmalar hem de genel kamuoyu için bir ilgi odağı haline gelmesine olanak tanıyacaktır.

Madencilik kaynaklı sosyoekonomik yapının ötesinde, bölgenin enerji kaynağı çeşitlendirilmesi de sürdürülebilir kalkınma vizyonunun tamamlayıcı bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Çan ilçesindeki jeotermal kaynaklar, yalnızca termal ve sağlık turizmi uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, çok yönlü bir bölgesel kalkınmayı destekleyebilecek bir jeotermal kullanım potansiyeli taşımaktadır. Türkiye’de 40-45 °C gibi düşük sıcaklıklara sahip jeotermal suların ısı pompasına gerek duyulmadan doğrudan alan ve bölgesel ısıtmada kullanıldığı (Mertoğlu vd., 2021) göz önüne alındığında, Bardakçılar sahasındaki akışkan sıcaklığı (59-67 °C) bu tür bir uygulama için uygun değerlerdedir. Bu sahanın bölgesel ısıtma amaçlı kullanımının kaynak potansiyeli açısından değerlendirilmesi için jeotermal kaynak (59 °C, ~3 l/sn) ve sondaj (67

°C, 95 l/sn; Bülbül vd., 2022) verileri ile bölgenin 1929-2025 dönemi yıllık ortalama sıcaklık değeri (15,2 °C; MGM, 2026) referans alınarak yaklaşık termal güç hesaplanmıştır ($P = Q \times \rho \times C_p \times \Delta T$; Mertoğlu vd., 2021; referans sıcaklık olarak bölgenin ortalama sıcaklık değeri alınmış olup, hesaplama kaynağın teorik ısıl potansiyelini yansıtmaktadır). Kaynak verileriyle bu değer ~0,55 MWt sonucunu verirken, sondaj verileriyle ~20,6 MWt olarak hesaplanmıştır. Ancak bu maksimum değer, sürdürülebilir bir üretim testiyle henüz doğrulanmadığından sahanın kesin ısıl kapasitesi olarak değil, potansiyel büyüklüğüne işaret eden bir üst sınır olarak değerlendirilmelidir.

Düşük-orta entalpili jeotermal kaynakların kademeli kullanımı, ısıl potansiyelin her sıcaklık seviyesinde en üst düzeyde değerlendirilmesini sağlayan bir yaklaşımdır; jeotermal akışkan bir uygulamada ısınısını kısmen bıraktıktan sonra, daha düşük sıcaklık gerektiren bir sonraki sürece yönlendirilerek kaynağın enerji potansiyelinden aşamalı olarak yararlanır (Rubio-Maya vd., 2015). Bu yaklaşımın en yaygın örneklerinden biri ABD'nin Klamath Falls (Oregon) bölgesinde uygulanmakta olup, 93 °C'lik jeotermal akışkan sırasıyla sera ısıtması, akuakültür ve sulama amacıyla kademeli olarak kullanılmaktadır (Rubio-Maya vd., 2015). Bölgedeki jeotermal kaynaklar arasında elverişli sıcaklık ve debi değerlerine sahip olan Bardakçılar sahası, ölçülen kuyu sıcaklığı itibarıyla Zhang vd. (2025)'in genel sıcaklık-uygulama sınıflandırmasında bölgesel ısıtma ve evsel sıcak su için önerilen 60-100 °C aralığına girmektedir. Bu özelliğiyle saha, kademeli bir düzenlemeyle planlanabilir bölgesel ısıtma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu tür jeotermal yatırımların ekonomik uygulanabilirliğinin artırılması için yer altı ısı çıkarım verimliliğinin geliştirilmesi ve sistem maliyetlerinin düşürülmesine yönelik ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Zhang vd., 2025).

Bölgesel ısıtmanın ekonomik olarak değerlendirilmesinde gözetilmesi gereken bir diğer unsur ise sismik risktir: Çan-Merkez ve Karalıda jeotermal kaynaklarında 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında gözlenen kalıcı debi azalması (Müller, 1955), büyük depremlerin jeotermal sistemlerin üretim kapasitesini uzun vadede geri dönüşü olmayan biçimde azaltabileceğini ve bu tesislerin işletme ekonomisinin sismik risk faktörü göz önünde bulundurularak planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Söz konusu riskler uygun mühendislik ve izleme stratejileriyle yönetildiğinde, kademeli kullanımın bölgesel kalkınmaya olan katkıları da bu sistemlerin önemini artırmaktadır. Jeotermal kaynaklı bölgesel ısıtma sistemleri ithal fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak toplumlar için enerji bağımsızlığı ve güvenliğini güçlendirmektedir; bunun yanı sıra bu sistemlerin geliştirilmesi ve işletilmesi mühendislik, inşaat, bakım ve idari hizmetler gibi farklı sektörlerde istihdam yaratmakta, bu projelere yapılan yatırımlar da kırsal ve kentsel alanlarda yerel ekonomileri canlandırarak ekonomik kalkınmayı teşvik etmektedir (Kassem ve Moscariello, 2024).

Kalkınma odaklı bulgulara ek olarak, jeotermal akışkanın kimyasal içeriği de ayrı bir inceleme konusunu oluşturmaktadır. Jeotermal akışkanın yalnızca bir ısı taşıyıcısı değil, aynı zamanda çözünmüş elementler açısından potansiyel bir maden kaynağı olarak ele alınması, bölgenin kaynak çeşitliliği stratejisine çok boyutlu bir perspektif kazandırmaktadır. Çan-Merkez ve Karalıda jeotermal kaynaklarında tespit edilen Li, B ve Sr konsantrasyonlarının, AB kritik hammaddeler listesinde (Grohol ve Veeh, 2023) yer alan elementlerden olması bölgesel önemini gündeme getirmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik, kaynakların rasyonel kullanımını ve kârlılık marjlarının fizibilite eşiğini aşmasını gerektirir. Bölgedeki element anomalilerinin görece düşük konsantrasyonu nedeniyle kısa ve orta vadede ekonomik bir madencilik yatırımından ziyade, rezervuar kökenini ve hidrojeokimyasal

süreçleri aydınlatan önemli birer jeokimyasal izleyici olarak değerlendirilmesi, Avrupa veri setiyle (Inzillo vd., 2026) kıyaslandığında daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

Sürdürülebilirliğin çevresel ve sosyal boyutu, yerel ekosistemin ve toplum sağlığının korunmasını gerektirmektedir. Alibeyçiftliği, Çan-Merkez ve Karailıca jeotermal kaynaklarında yüksek konsantrasyonda tespit edilen As ve Mn, 2023 yılında AB kritik hammaddeler listesine eklenmiş olsa da bu sınıflandırma ekonomik önem ve arz riski kriterlerine dayandığından, söz konusu elementlerin toksikolojik risk profiliyle doğrudan bir ilişkisi bulunmamaktadır (Grohol ve Veeh, 2023). Dolayısıyla mevcut lokal sistem koşullarında bu elementler ekonomik bir hedeften ziyade titizlikle yönetilmesi gereken birer çevresel risk faktörü olarak değerlendirilmelidir. Bölgedeki jeotermal enerji faaliyetlerinin güvenli sürdürülebilirliği, bu elementlerin alıcı ortama deşarj edilmeden önce çevresel bir izleme sürecine tabi tutulmasına ve uygun arıtma/reenjeksiyon prosedürlerinin uygulanmasına bağlıdır.

Enerji Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi

Çan ilçesindeki enerji üretim faaliyetlerine bağlı olarak, yüksek hacimli bir atık yönetimi ihtiyacı doğmaktadır. Çanakkale Çevre Durum Raporu 2024 yılı verilerine göre, ilçedeki iki termik santralin yıllık toplam kömür tüketimi yaklaşık 4 milyon tona ulaşmaktadır. Bu tesislerde enerji üretim süreci sonucunda açığa çıkan toplam yıllık uçucu kül miktarı ise aynı raporda 1.115.369 ton olarak kaydedilmiştir. Çanakkale genelinde (Çan ilçesi dahil beş termik santral için) hesaplanan verilere göre, toplam kül atığının %27,33'ü geri kazanılmakta, %72,67'si ise düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmektedir (ÇÇŞİDİM, 2025); ancak bu oranın Çan ilçesi özelinde farklılık gösterip göstermediğine dair ayrı bir veri raporda yer almamaktadır.

Bu genel tablonun yanı sıra, ilçede faaliyet gösteren pulverize kömür yakan termik santralde oluşan uçucu kül ve sentetik alçı taşının (baca gazı desülfürizasyonu-FGD-jipsi), 2020 yılından itibaren toplamda 1,3 milyon tonunun ihraç edildiği rapor edilmiştir (ODAŞ, 2024). Bu ihracata ek olarak, 2024 yılında santral ile bir çimento fabrikası arasında, toplam 2 milyon ton uçucu kül tedarikini kapsayan uzun vadeli bir iş birliği anlaşması imzalanmıştır (Akçansa, 2025; ODAŞ, 2025). Söz konusu iş birliği, endüstriyel simbiyoz yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmekte olup, uçucu külün alternatif hammadde olarak çimento ve hazır beton üretim sürecine entegre edilmesini içermektedir. Bu kapsamda, 2025 yılında devreye alınan kül değirmeni yatırımıyla birlikte tesisin uçucu kül üretim kapasitesi artırılmış; bu sayede piyasaya arz edilebilir ürün niteliğine daha yüksek oranda dönüştürülen uçucu kül, çimento ve hazır beton üreticilerine sunulmaktadır (ODAŞ, 2025).

Uçucu küllerin farklı sektörlerde kullanımı depolama sahası ihtiyacının azaltılması ve olası çevresel risklerin kontrol altına alınması açısından önem taşımaktadır. Uçucu küller; zeolit sentezi, polimer kompozitler, tarımsal toprak ıslahı ve atık su arıtımı gibi farklı sektörel uygulamalarda da ekonomik bir değer olarak ön plana çıkmaktadır (Kuznia, 2025). Ayrıca kapatılmış yer altı maden sahalarında uygulanan uçucu kül enjeksiyonu tekniklerinin, atık bertarafı ile arazi rehabilitasyonunu eş zamanlı sağlayarak AMD risklerinin azaltılmasına katkı sunabileceği bildirilmektedir (Ahmaruzzaman, 2010). Bölgeden alınan örneklerle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmada bu yaklaşımın etkinliği ampirik olarak doğrulanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve İleri, 2020). Bu çerçevede, AMD odaklarının rehabilitasyonunda ve pasa stabilizasyonunda uçucu kül kullanımına yönelik uygulamalar, Çan özelinde madencilik-enerji sektörleri arasında döngüsel bir kaynak yönetimi modeli kapsamında uygulanabilir.

Bölgedeki endüstriyel simbiyoz uygulamaları, ilçe'deki enerji-maden-sanayi etkileşiminin döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda bütüncül bir planlamayla ele alınması gerekliliğine işaret etmektedir. Atıkların geri kazanımıyla başlayan bu süreç, rehabilite edilen maden alanlarının yeniden ekonomiye kazandırılmasıyla tamamlanmaktadır. TKİ ÇLİ sahasında madencilik faaliyeti tamamlanan ve rehabilite edilen alan üzerine 2024 yılında kurulan, 5 MW kurulu güce sahip güneş enerjisi santrali, bu yaklaşıma somut bir uygulama örneğidir. Kurum yetkililerinden alınan güncel verilere göre 80.000 m² alana yayılan tesisin 2025 yılı toplam elektrik üretimi 7.548 MWh olarak gerçekleşmiş; bu üretimin %28'i (2.117 MWh) işletmenin öz tüketimine, %72'si (5.431 MWh) ise şebekeye verilmiştir. Bu uygulama; atık yönetimi, arazi rehabilitasyonu ve yenilenebilir enerji üretimini bir arada ele alan, karbon ayak izinin azaltılması hedefleriyle uyumlu bir model olarak değerlendirilebilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Biga Yarımadası'nın jeoekonomik açıdan öne çıkan bir konumunda yer alan Çan ilçesi, morfolojik ve tektonik özellikleri, jeotermal kaynakları ve maden yataklarıyla tarihsel süreçten günümüze etkin bir yerleşim ve üretim merkezi niteliğini sürdürmektedir. Bu çalışmada, Çan ve yakın çevresinin doğal kaynak potansiyeli, sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifi kapsamında değerlendirilmiş ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır.

Bölgede yer alan düşük-orta entalpili jeotermal kaynaklar (Alibeyçiftliği hariç) hâlihazırda termal ve sağlık turizmi amacıyla kullanılmaktadır. Bardakçılar ve Karailıca jeotermal alanlarına ait kalsedon jeotermometre verileri, ölçülen kuyu içi sıcaklıklarından (sırasıyla 67 °C ve 61,9 °C) daha yüksek, 70 °C'nin üzerindeki rezervuar sıcaklıklarına işaret etmektedir. Bu tahmini sıcaklıklar, söz konusu

kaynakların farklı kullanım alanlarında kademeli olarak değerlendirilme potansiyeli taşıdığını göstermekle birlikte, işletme parametrelerinin kesinleştirilmesi için uzun süreli/sürdürülebilir üretim testleriyle doğrulanması gerekmektedir. Bununla birlikte, Alibeyçiftliği, Çan-Merkez ve Karailıca kaynaklarında tespit edilen yüksek As ve Mn konsantrasyonları, bu suların içme suyu olarak kullanılmasını engellemekte ve alıcı ortama deşarj öncesi çevresel izleme ile arıtma süreçlerini zorunlu hale getirmektedir. Karailıca ve Çan-Merkez akışkanlarında belirlenen Li, B ve Sr içerikleri ise görece düşük konsantrasyonları nedeniyle kısa vadede ekonomik bir geri kazanım hedefinden çok, hidrojeokimyasal süreçleri aydınlatan jeokimyasal izleyiciler olarak değerlendirilmelidir.

Yaklaşık 92,5 milyon ton linyit rezervine sahip olan bölge, iki termik santral ile yerel elektrik enerjisi üretiminde rol üstlenmektedir. Enerji hammaddelerinin yanı sıra bölge, seramik sanayisinin temel girdileri olan kaolin, sileks ve feldispat gibi endüstriyel hammadde rezervleriyle de öne çıkmaktadır. Türkiye, küresel feldispat üretiminin %32'sini gerçekleştirmekte ve AB ihtiyacının %51'ini tek başına karşılamaktadır; bu nedenle feldispat 2023 yılında AB kritik hammaddeler listesine girmiştir (Grohol ve Veeh, 2023). Türkiye'de 2024 sonu itibarıyla 190 feldispat işletme ruhsatlı sahası bulunmaktadır; bunlardan 7'si Çanakkale'de (Durmaz vd., 2026), 2'si ise Çan'dadır. Türkiye genelinde tüvenan olarak doğrudan değerlendirilebilen yüksek kaliteli feldispat rezervlerinin hızla tükenmesi nedeniyle geriye daha düşük kaliteli rezervlerin kaldığı bildirilmektedir (Durmaz vd., 2026). Bu durum, feldispatın kritik hammadde statüsüyle birleştiğinde arz güvenliği açısından taşıdığı önemi daha da artırmaktadır. Bu veriler ışığında, Çan ve çevresindeki feldispat kaynaklarının saha ölçeğinde karakterize edilmesi ve arz güvenliği perspektifinden ayrıca değerlendirilmesi önerilmektedir.

Kumarlar sahasında belirlenen Sb ve Ge içerikleri (Bozkaya ve Banks, 2015), Halılağa sahasının batı skarn zonundaki yüksek Zn tenörü (%16,76; Doerksen vd., 2015) ve kaynak tahminlerine dahil edilen Mo tenörleri (%0,0057-0,0087; Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016) bölgedeki kritik mineral potansiyeline işaret etmektedir. USGS'in (2026a) kritik mineraller listesinde yer alan Re, Te, Ga ve In gibi diğer elementlerin yan ürün geri kazanım potansiyeli ise metalik maden yataklarında doğrulanmayı bekleyen bir araştırma alanıdır. Ayrıca Mo ve Zn, ETKB (2025) raporunda hem stratejik hem de kritik maden olarak tanımlanmaktadır. Bu yataklarda yapılacak detaylı mineralojik ve jeokimyasal araştırmalar ile kritik minerallerin belirlenmesi, maden işletmelerinin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmanın yanı sıra sektörel katma değerini yükseltilmesine de katkı sağlayacaktır.

Bölgedeki madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliği, yalnızca ekonomik potansiyelle değil, çevresel risklerin yönetimiyle de ele alınması gereken bir konudur. Yüksek kükürt içerikli kayaçların ve pasaların oksidasyonu sonucu gelişen AKD/AMD, su kaynaklarının As, Fe ve Al gibi elementlerle kirlenmesine yol açarak ekosistem üzerinde çevresel riskler oluşturmaktadır. Bu kapsamda, termik santral atığı uçucu küllerin asidik drenaj nötralizasyonu ve pasa oksidasyonunun sınırlandırılmasındaki etkinliğinin saha ölçeğinde araştırılması önemlidir. Uçucu küllerin kullanım alanlarının artırılması, atık hacminin azaltılması açısından döngüsel ekonomi odaklı çözüm seçenekleri arasında yer almaktadır.

Çevresel risklerin yönetiminin yanı sıra, bölge ekonomisinin sektörel çeşitlendirilmesi de sürdürülebilirlik hedefleri açısından önem taşımaktadır. Rehabilit edilen linyit sahasında güneş enerjisi santrali kurulması gibi uygulamalar bu alanları yenilenebilir enerji üretimine kazandırırken, jeoturizm uygulamalarının

geliştirilmesi söz konusu sahaların sosyo-ekonomik açıdan yeniden değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Bununla birlikte ilçe ekonomisinin %14,8 oranında madencilik sektörüne bağımlı olması, sektörel çeşitlendirme gereksinimini ortaya koymaktadır. Bu bağımlılığın azaltılması sürecinde toplumsal cinsiyet eşitliği de gözetilmesi gereken bir diğer boyuttur. Sektördeki kadın istihdam oranının (%3,53), küresel madencilik sektörü ortalamasının (%10-15; Bansal vd., 2024) oldukça altında kalması, sosyal sürdürülebilirlik açısından geliştirilmesi gereken bir alana işaret etmektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, bölgenin sürdürülebilir kaynak yönetimi ekseninde gelişimini desteklemek amacıyla aşağıdaki öncelikli öneriler sunulmaktadır:

(i) Başta Kocabaş Çayı olmak üzere önemli su kaynaklarında ve madencilik faaliyetlerinde gerçek zamanlı dijital izleme sistemlerinin ve İHA tabanlı akıllı uygulamaların operasyonel süreçlere entegre edilmesi,

(ii) Jeotermal enerji potansiyelinin değerlendirilebilmesi için MT/ERT gibi jeofizik yöntemler, yapısal analiz, sıcaklık gradyanı verileri ve hidrojeolojik modelleme ile hedef rezervuar zonlarının belirlenmesi, ardından bu zonlarda derin sondajların planlanması,

(iii) Jeotermal kaynakların konut ısıtma, seracılık ve endüstriyel süreçleri kapsayan kademeli bir kullanım modeliyle planlanarak enerji verimliliğinin artırılması,

(iv) Metalik maden yataklarındaki kritik mineral içeriğinin (Ge, Mo, Zn ve Sb vb.) detaylı mineralojik ve jeokimyasal analizlerle belirlenerek geri kazanım potansiyelinin tekno-ekonomik açıdan değerlendirilmesi,

(v) Termik santral atığı uçucu küllerin kullanım alanlarının çeşitlendirilerek yaygınlaştırılması,

(vi) Rehabilit edilen linyit sahasında hâlihazırda uygulanan 5 MW kurulu güce sahip

güneş enerjisi santrali örneğinin farklı sahalarda da hayata geçirilmesi,

(vii) İnkaya Mağarası gibi bilimsel önemi yüksek sahaların, kazı faaliyetleri tamamlandıktan sonra bölgesel jeomirasın bir parçası olarak koruma-kullanma dengesi gözetilerek jeoturizme kazandırılması,

(viii) STEM alanlarında kadın istihdamını, mesleki eğitimini ve kariyer ilerlemesini teşvik eden politikalarla sektörde kapsayıcı bir iş gücü yapısının oluşturulması.

Sonuç olarak bu çalışma, Çan ilçesinde su-enerji-maden etkileşiminin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Önerilen entegre yaklaşım, bölgenin çevresel açıdan sürdürülebilir bir üretim yapısına geçişini desteklerken, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın temiz enerji, rekabetçi ve yeşil endüstri ile döngüsel ekonomi eylem alanlarıyla uyumunu güçlendirme potansiyeli taşımaktadır.

EXTENDED SUMMARY

Geological conditions and the availability of natural resources have historically played a significant role in determining the location of human settlements. Situated in a geoeconomically prominent part of the Biga Peninsula, the Çan district has maintained its character as an active settlement and production center from historical times to the present day, owing to its morphological and tectonic characteristics, geothermal resources, and rich mineral deposits. In this study, the geothermal energy and mining potential of Çan and its immediate surroundings are examined in light of field observations, hydrogeochemical analyses, current institutional data, and literature findings. The multifaceted relationships between geological factors and the potential for energy, industrial raw materials, and metallic minerals are addressed from a sustainable resource management perspective, encompassing

environmental risk management, circular economy, and inclusive regional development. Furthermore, the study evaluates the district's natural resource potential along the water-energy-mining nexus and presents actionable recommendations prioritizing environmental remediation with economic viability.

The geological basement of the Çan district comprises the Paleozoic Kazdağ metamorphics (Bingöl, 1969) and tectonically bounded, low-grade metasedimentary rocks of probable pre-Triassic age assigned to the Kalabak formation (Krushensky et al., 1980). These units are structurally overlain by the Permian-Middle Triassic Karakaya complex (Bingöl et al., 1973), which is predominantly in tectonic contact with the underlying rocks but locally rests unconformably upon them. The region has been further shaped by the Upper Cretaceous Çetmi melange (Okay et al., 1990), which tectonically overlies the Kazdağ metamorphics and the Karakaya complex; the Oligo-Miocene Evçiler pluton (Öngen, 1978), representing multi-stage products of magmatic activity; and the Çan volcanics (Ercan et al., 1995), which are associated with metallic ore deposits. As magmatic activity declined during the Early-Middle Miocene, the economically important lignite-bearing Çan formation (Hezarfen, 1976) accumulated in tectonically controlled lacustrine basins. It is unconformably overlain by the Pliocene Kulfa formation (Balkış and Yazıcı, 1996) and Quaternary alluvium.

The tectonic framework of the region is governed by the southern branch of the North Anatolian Fault Zone (particularly the Çan-Biga fault zone, Şaroğlu et al., 1987, and the Yenice-Gönen fault, Ketin and Roesli, 1953), which, through its NE-SW-trending right-lateral strike-slip character (Barka and Gülen, 1988), controls both basin morphology and the distribution of geothermal resources and alteration zones. This tectonic regime, which has historically produced destructive earthquakes in 1737 (Ambraseys and

Jackson, 2000) and 1953 (Ketin and Roesli, 1953) and maintains active seismicity today, constitutes a fundamental factor determining the geological evolution and the energy and mineral resource potential of the region.

Within the scope of this study, field investigations in the Çan district were conducted at the geothermal fields in 2024 and at the mining quarries and operations in 2025. Current data on geothermal and mining fields in the region were obtained through official requests submitted to the relevant institutions and through consultations with institutional representatives. The physicochemical properties of the geothermal resources, including temperature, pH, electrical conductivity, and salinity, were measured in situ using a portable multiparameter instrument, while the locations of geothermal resources and mineral deposits were recorded with a handheld GPS device. For the hydrogeochemical analyses, sampling was carried out only at the Karailıca geothermal resource, while data for the other fields were compiled from the literature. The major, minor, and trace element analyses of the collected samples were performed at MTA laboratories using ICP-OES, ICP-MS, and IC instruments. Piper and Schoeller diagrams were used to interpret hydrogeochemical processes, whereas the Na-K-Mg diagram (Giggenbach, 1988) was used to assess the reliability of geothermometer calculations.

Among the goals of sustainable development, geothermal resources stand out for their low operating costs and diverse applications. The Çan geothermal potential is represented by four fields, namely Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, Karailıca, and Bardakçılar, with surface temperatures of approximately 31-58.4 °C. During the cold and glacial phases of the Paleolithic, these fields are suggested to have offered potential habitats for early human communities owing to their microclimatic effects (Atabay and Körpe, 2019).

The 1953 Yenice-Gönen earthquake caused a permanent decline in discharge at the Çan-Merkez and Karailıca geothermal systems (Müller, 1955). Examination of borehole data from the geothermal fields shows that, in Çan-Merkez, the Çan-1 well (300 m) yielded 0.6 L/s at 43 °C, whereas the Çan-2 well (100 m) yielded only 0.2 L/s at 28-36 °C (Öktü et al., 1991). In Karailıca, the Eti-1 well (450 m) exhibited a high yield of 2.1-8 L/s at 59.2-61.9 °C (Kahraman et al., 2005), while the nearby Eti-2 well (350 m) yielded only 0.6 L/s at 46 °C. This discrepancy despite close proximity indicates that reservoir productivity is largely governed by local structural and lithological controls. The deepest borehole in the region was drilled at Bardakçılar to a depth of 750 m, yielding fluid at 67 °C with a discharge of 95 L/s (Bülbül et al., 2022).

Alibeyçiftliği water belongs to the Na-SO₄ facies, while Bardakçılar, Karailıca, and Çan-Merkez fall within the Na-Ca-SO₄ facies. This sulfate dominance is attributed to pyrite oxidation within acid-sulfate hydrothermal alteration zones west of Çan (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007), an interpretation corroborated by the identification of jarosite in altered rocks at Alibeyçiftliği (Deniz, 2010). Sulfide oxidation also mobilizes trace elements: As, F⁻, Mn, and B concentrations in the Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, and Karailıca waters exceed national (İTASHY, 2016) and international (WHO, 2022) drinking-water limits, rendering these waters unsuitable for potable use and warranting advanced treatment prior to discharge and periodic regional monitoring.

Li concentrations measured in the Karailıca and Çan-Merkez geothermal fluids (1.12 and 1.15 mg/L, respectively) indicate that a certain degree of element enrichment has occurred through prolonged water-rock interaction. A similar interpretation applies to the B (3.9-4.9 mg/L) and Sr (3.6-4.4 mg/L) concentrations measured at Çan-Merkez. However, these element contents remain below not only those of geothermal fields showing high enrichment worldwide, but also

those of Europe's relatively low-enrichment fields (Wang et al., 2025; Zhang et al., 2025; Inzillo et al., 2026). Therefore, in terms of their Li, B, and Sr contents, these fluids should be regarded not as a short-term economic recovery target, but rather as geochemical tracers that illuminate hydrogeochemical processes.

The reservoir temperatures of the geothermal resources in the Çan district were evaluated using silica and cation geothermometers. On the Giggenbach (1988) diagram, only Bardakçılar plots within the partially equilibrated waters field. Since chalcedony solubility governs silica equilibrium below 140 °C (Eroğlu and Aksoy, 2003), the chalcedony geothermometer results of 28-39 °C, 52-59 °C, 71-80 °C, and 76-91 °C for Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, Karılıca, and Bardakçılar, respectively, are considered the most appropriate estimates among the available data.

The $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ data of the geothermal resources in the Çan district (Yalçın, 2007; Baba and Deniz, 2008; Karaca et al., 2013) reveal that Alibeyçiftliği, Karılıca, and Bardakçılar plot within the GMWL-MMWL range, reflecting recharge of regional meteoric origin, whereas Çan-Merkez exhibits markedly different isotopic behavior. At this field, evidence of an oxygen-18 shift, driven by a deep process associated with high-temperature rock/ CO_2 interaction, is observed, a finding further supported by the field's highest HCO_3^- and alkalinity values (Yalçın, 2007). Tritium data (Yalçın, 2007; Baba and Deniz, 2008) point to distinct mixing processes among the fields: the low ^3H values at Alibeyçiftliği (0.43 TU) and Karılıca (0.31-0.55 TU) indicate long groundwater residence times predating the 1950s thermonuclear era, while the markedly lower and narrower ^3H range at Bardakçılar (0.05-0.22 TU) points, together with corroborating geochemical evidence discussed below, to an even longer residence time and a more deeply circulating hydrogeological system. In contrast, the higher and more variable ^3H content at Çan-

Merkez (1.01-3.5 TU) reflects a shallow/modern water component periodically entering the system through hydraulic connection with the Kocabaş Stream alluvial aquifer.

In areas of widespread Oligo-Miocene volcanic and intrusive rock outcrops around Çan, Au, Cu, Pb, Zn, and Fe mineralization has formed the basis of mining activities extending from antiquity to the present day (Yiğit, 2012). The distribution of mineral deposits and occurrences exhibits NE-SW-trending zonation (Engin et al., 2012). The region hosts significant mineralization systems, notably the Halılağa (Cu-Au) porphyry system and the Ağı Dağı (Au-Ag) HS epithermal deposit. Halılağa's indicated resource (182.7 Mt at 0.27% Cu, 0.30 g/t Au, and 0.0057% Mo) and inferred resource (178.7 Mt at 0.23% Cu, 0.24 g/t Au, and 0.0087% Mo) (Doerksen et al., 2015) position it as a candidate to be one of the largest Cu-Au deposits in the Biga Peninsula (Yiğit, 2012). Ağı Dağı, with combined Baba Dağı and Deli Dağı resources (Yiğit, 2012) and proven/probable reserves of 54.4 Mt at 0.67 g/t Au (~1.17 Moz; Cormier et al., 2017), represents one of the largest HS epithermal gold systems in the Biga Peninsula.

The Kumarlar and Kocayayla deposits are structurally controlled, vein-type polymetallic systems reflecting the region's base-metal potential. Kumarlar, a Pb-Zn-Cu $\pm$ Au deposit, is an LS-IS epithermal system (Bozkaya and Banks, 2015); ore is largely hosted within amorphous silica bands precipitated by seismically triggered pressure drops, with average Au and Ag contents of 0.2 ppm and 1.31 ppm, respectively, alongside Sb, Cd, and Ge (Bozkaya and Banks, 2015). Kocayayla is an Au-poor Pb-Zn $\pm$ Cu deposit classified as an IS-type epithermal system (Akısa and Demirela, 2026). It is characterized by a brecciated contact zone (Gjelsvik, 1962) and stockwork mineralization associated with a Cu-Mo anomaly, which may indicate an underlying porphyry system (Yiğit, 2012). Geochemical analyses further show

marked enrichment in base metals, accompanied by elevated concentrations of As, Cd, Sb, and Ag (Akiska and Demirela, 2026). The Yuvalar Fe-Cu skarn deposit is one of the most significant centers preserving traces of intense ancient metallurgical activity in the region. Mineralization occurs within a skarn zone developed at the contact between a granodiorite intrusion and a metamorphic sequence comprising alternating mica schist and marble (Pernicka et al., 2003). Radiocarbon and thermoluminescence dating indicate at least two phases of copper production, one during the second millennium BC and another in the Roman period, the latter dated to approximately AD 70 ± 170 (Pernicka et al., 2003). The presence of seven slag heaps, amounting to approximately 100,000 tons, together with ceramic finds ranging from the Archaic to the Byzantine periods (Körpe, 2024), points to a prolonged history of metallurgical activity at the site.

The Çan district possesses substantial industrial raw material potential arising from intense hydrothermal alteration processes associated with Oligo-Miocene calc-alkaline volcanism. The Bahadırlı, Duman, and Çaltıkara kaolin deposits in the region are structurally controlled and exhibit distinct evolutionary histories (Ünal Ercan et al., 2022a). The silex occurrences exposed in the region represent remnants of fossil epithermal systems within the Biga Peninsula, having developed through a two-stage hydrothermal process (early acid-sulfate alteration followed by late-stage alkali-chloride silicification; Ünal Ercan et al., 2022b). With their high silica content (>95%), these deposits constitute an important raw material for the ceramics industry (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Finds at İnkaya Cave and its surroundings demonstrate that silex was actively exploited for tool production during the Middle Paleolithic (Özer et al., 2018). In addition, the region's high-purity limestone deposits serve mainly as feedstock for thermal power plants and as aggregate for

the construction sector. Although the diatomite occurrences within the Çan formation have wide-ranging industrial applications, the local occurrences around Keçiagılı are not currently exploited owing to their low quality and limited reserves (Ertin, 2001). Çan stone, a variegated and patterned rock resulting from pyrite oxidation and limonitization within rhyolitic tuffs, is valued as a construction and decorative material owing to its ease of workability and high thermal resistance (Tekin, 2009).

The Çan lignite basin (~92.5 Mt reserve; MTA, 2026), cropping out around the district center and surrounding villages, is defined by elevated sulfur content (0.21-14.36 wt%), attributed to volcanic activity during basin deposition (Gürdal, 2011). Pyrite, the dominant mineral phase in the coal, is possibly associated with several trace elements, most notably As, which averages 253.5 mg/kg (Baba et al., 2016), roughly 30 times the world coal average (Ketris and Yudovich, 2009). Hosting two thermal power plants with a combined 650 MW capacity, the basin substantially supports Türkiye's energy security, while requiring continued technical measures for environmental and emission management.

Çan is a significant region where natural acid rock drainage from altered volcanic rocks and acid mine drainage from mining activities co-occur. Regional waters show pH as low as 3.47 and As up to 92.9 µg/L (Şanlıyüksel Yücel, 2013), roughly nine times the WHO (2022) limit. Altered rocks reach 735.7 mg/kg As, with groundwater As up to 150 µg/L (Baba et al., 2012). The Etili coal field's nine acid mine lakes (Şanlıyüksel Yücel et al., 2014) represent one of the highest known densities in Türkiye, posing ecological risk through low pH (<4) and elevated Al, Fe, Mn, Zn, and Ni (Şanlıyüksel Yücel and Yücel, 2017). Mitigation approaches include UAV-based mine lake monitoring (Şanlıyüksel Yücel and Yücel, 2017), fly-ash-based metal adsorption (İleri and Şanlıyüksel Yücel, 2020), and fly ash amendment

of waste rock to neutralize drainage (Şanlıyüksel Yücel and İleri, 2020). Complementing these efforts, the TKİ ÇLİ planted 1,917,088 seedlings over 1,335 ha (1991-2023; TKİ, 2026) to enhance soil stability, limit erosion, and reduce AMD generation.

Çan hosts 38 active mining licenses, directly employing 6,937 people (14.8% of the population; TÜİK, 2025), with female employment (3.53%) far below the global mining average (10-15%; Bansal et al., 2024), indicating structural gender imbalance and, alongside single-sector dependence, exposing the region to social fragility risks.

Bardakçılar's high discharge and temperature make it well suited for cascading applications such as district heating and greenhouse cultivation. After the 1953 earthquake, discharge reductions observed at Çan-Merkez and Karailıca (Müller, 1955) warrant careful seismic risk planning for such investments. Elevated As and Mn at Alibeyçiiftliği, Çan-Merkez, and Karailıca, despite their 2023 EU critical raw materials listing (Grohol and Veeh, 2023) based on economic/supply criteria rather than toxicological risk, should be managed as environmental risk factors under current local conditions.

Thermal power plants in Çan consume approximately 4 million tons of coal annually, generating 1,115,369 tons of fly ash. Across the five thermal power plants operating in Çanakkale Province, approximately 27% of ash waste is recovered, while the remaining 73% is disposed of in landfills; however, Çan-specific data are not available (ÇÇŞİDİM, 2025). Since 2020, 1.3 million tons of fly ash and FGD gypsum have been exported (ODAŞ, 2024), and a 2024 agreement to supply 2 million tons of fly ash to a cement plant as a clinker substitute exemplifies industrial symbiosis (Akçansa, 2025; ODAŞ, 2025). Additionally, the 5 MW solar power plant on a rehabilitated TKİ ÇLİ site, which combines land rehabilitation, waste

management, and renewable energy generation, further exemplifies circular-economy integration: of its 7,548 MWh total output in 2025, ~28% (2,117 MWh) was used for the facility's self-consumption.

Based on these findings, this study evaluates the natural resource potential of the Çan district from a sustainable resource management perspective. Priority recommendations include real-time digital/UAV monitoring, deep-geothermal reservoir drilling, cascading geothermal use, critical-mineral determination (Ge, Mo, Zn, Sb, etc.) in metallic ore deposits, diversified fly ash applications, solar power plant replication at other abandoned-mine sites, and the promotion of women's employment. These recommendations demonstrate that a holistic approach to the water-energy-mining nexus in the Çan district will support alignment with the objectives of the European Green Deal.

KATKI BELİRTME

Veri paylaşımı sağlayan Çanakkale İl Özel İdaresi ve Çanakkale Sosyal Güvenlik İl Müdürlüğüne, arazi çalışmalarına sundukları katkılardan dolayı Prof. Dr. Mehmet Ali Yücel'e ve Prof. Dr. Mustafa Çınar'a, ayrıca çalışmanın niteliğinin geliştirilmesine katkı sunan değerli hakemlere teşekkür ederim. Bu çalışmada kullanılan hidrojeokimyasal analiz sonuçları ÇOMÜ-BAP FBA-2023-4409 no'lu proje kapsamında üretilmiş ve bu proje tarafından desteklenmiştir.

ORCID

Deniz Şanlıyüksel Yücel  <https://orcid.org/0000-0001-6546-5624>

KAYNAKLAR / REFERENCES

Abaka, M. A. (2024). *Kumalar (Çan-Çanakkale) polimetallik (Pb-Zn-Cu±Au) cevherleşmesini oluşturan çözeltilerin özellikleri* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Ackah-Baidoo, P. F. (2025). Gender and mining: Assessing the landscape for women entrepreneurs in the critical minerals supply chain. *The Extractive Industries and Society*, 24, Article 101753. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101753>
- AFAD, (2026, 25 Mart). *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Kataloğu*. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- Akçansa, (2025). *2025 Entegre Faaliyet Raporu*. Akçansa Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. https://www.akcansa.com.tr/wp-content/uploads/2026/04/Akcansa_2025_EFR_TR-21-nisan-v2.pdf
- Akdaş, H., Bozkurt, M. R. ve Dikduran, T. (2001). Çan taşı – Desenli yapıtaşı. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, (s. 153-162). Afyon.
- Akiska, S. & Demirela, G. (2026). Geology, Alteration, Geochemistry, and Regional Sulfur Isotope Constraints on Pb–Zn ± Cu Mineralization in the Biga Peninsula (NW Türkiye): Insights from the Kocayayla Deposit. *Applied Sciences*, 16(5), 2604. <https://doi.org/10.3390/app16052604>
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A. ve Tekin, Z. (2005). *Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri* (Envanter Serisi no: 201). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Altunkaynak, Ş., Dilek, Y., Genç, C.Ş., Sunal, G., Gertisser, R., Furnes, H., Foland, K. & Yang, J. (2012). Spatial, temporal and geochemical evolution of Oligo-Miocene granitoid magmatism in western Anatolia, Turkey. *Gondwana Research*, 21(4), 961-986. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.010>
- Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (2000). Seismicity of the Sea of Marmara since 1500. *Geophysical Journal International*, 141(3), F1-F6. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x>
- Atabay, M. ve Körpe, R. (2019). *Antik Çağ'dan Günümüze Çan*. Emsal Matbaa, Ankara.
- Aydın, A. (2014). *Çan-Çanakkale Bölgesi Kaolinit Yataklarının ve Çevresinin Petrografik Mineralojik ve Jeokimyasal İncelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baba, A. ve Deniz, O. (2008). *Biga Yarımadası'ndaki jeotermal kaynakların potansiyeli, kullanım alanlarının belirlenmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi* (Proje no: 104Y082). TÜBİTAK ÇAYDAG (yayımlanmamış).
- Baba, A., Deniz, O. ve Şanlıyüksel, D. (2008). Kazdağları kuzeydoğusunda bulunan soğuk su kaynaklarının izotopik özellikleri. *II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu*, (s. 1-12).
- Baba, A., Ertekin, C. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2012). High arsenic levels in water resources resulting from geogenic resources: A case study from Muratlar Region, NW Turkey. *39th International Association of Hydrogeologists Congress*, Eylül 16-21, Niagara Falls, Canada, (s. 110).
- Baba, A., Gürdal, G. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2016). Enrichment of trace element concentrations in coal and its combustion residues and their potential environmental and human health impact: Can Coal Basin, NW Turkey as a case study. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 19(5-6), 455-480. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2016.083665>
- Balkış, M. ve Yazıcı, B. (1996). *TKİ Çan Linyit İşletmesi Raporu*. Türkiye Kömür İşletmeleri (yayımlanmamış).
- Bansal, S., Nangia, P., Singh, S. & Cichon, D. (2024). Where's our share: Agenda for gender representation in mining industry. *Resources Policy*, 90, Article 104820. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104820>
- Barka, A. & Reilinger, R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, 40(3), 587-610. <https://doi.org/10.4401/ag-3892>
- Barka, A. A. & Gülen, L. (1988). New constraints on age and total offset of the North Anatolian Fault Zone: implications for tectonics of the eastern Mediterranean region. *Middle East Technical University Journal of Pure and Applied Sciences*, 21(1-3), 39-63.
- Bingöl, E. (1969). Kazdağ masifinin merkezi ve güneydoğu kesiminin jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 72, 110-123.
- Bingöl, E., Akyürek, B. ve Korkmazer, B. (1973). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve Karakaya formasyonunun bazı özellikleri. *Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbilimleri Kongresi*, (s. 70-77). MTA Genel Müdürlüğü.

- Birkle, P. & Satır, M. (1995). Dating, geochemistry and geodynamic significance of the Tertiary magmatism of the Biga Peninsula, NW Turkey. A. Erler, T. Ercan, E. Bingöl, S. Örçen (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on the Geology of the Black Sea Region*, (pp. 171-180). General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara.
- Borat, M. (1992). *Türkiye diyatomitlerinin özellikleri ve filtrasyon karakteristikleri* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bozcu, M., Akgün, F., Gürdal, G., Bozcu, A., Kapan Yeşilyurt, S. ve Karaca, Ö. (2008). *Çan-Yenice-Bayramiç (Çanakkale) Linyit Havzasının Sedimentolojik, Petrolojik, Jeokimyasal ve Palinolojik İncelenmesi* (Proje no: 105Y114). TÜBİTAK.
- Bozkaya, G. & Banks, D. A. (2015). The importance of supersaturated silica deposition for base-metal Au-Ag mineralization in western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24(2), 99-110. <https://doi.org/10.3906/yer-1405-10>
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey - a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 3-30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Brunetti, P. (2016). *Magmatic-hydrothermal evolution and post-ore modifications of the Halilağa porphyry Cu-Au deposit, NW Turkey* [Master's thesis]. University of British Columbia.
- Buyondo, K. A., Kasedde, H. & Kirabira, J. B. (2022). A comprehensive review on kaolin as pigment for paint and coating: Recent trends of chemical-based paints, their environmental impacts and regulation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, Article 100244. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100244>
- Bülbül, E., Çam, D., Büyükboyacı, Ü. & Karaca, S. (2022). *Çanakkale ili Çan ilçesi AR:17/03 no.lu Bardakçılar jeotermal kaynak arama ruhsat alanına ait jeotermal etüt (jeoloji-jeofizik) ve ÇÇB-2010/20 jeotermal araştırma sondajı kuyu bitirme raporu*. MTA Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Chenaker, H., Houha, B. & Vincent, V. (2018). Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria. *Geothermics*, 75, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.009>
- Cheng, H., Zhou, Y. & Liu, Q. (2019). Kaolinite Nanomaterials: Preparation, Properties and Functional Applications. In P. Yuan, J. Thill & F. Bergaya (Eds.), *Nanomaterials from Clay Minerals: Guide for Advanced Materials Applications*, (pp. 285-334). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00006-5>
- Choi, Y. (2023). Recent Advances in Smart Mining Technology. *Applied Sciences*, 13, Article 3726. <https://doi.org/10.3390/app13063726>
- Clark, I. & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press.
- Cormier, A., Jutras, M., Welhener, H., Minard, T., Chiaramello, P. & Cremeens, J. (2017). *NI 43-101 Feasibility Study Technical Report on the Ağı Dağı Project and Preliminary Economic Assessment on the Çamyurt Project, Çanakkale Province, Turkey* (Technical Report). JDS Energy & Mining Inc. (yayımlanmamış).
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Cunningham-Dunlop, I. R. & Lee, C. (2007). *Ağı Dağı gold property, Çanakkale Province, Turkey* (Technical Report). Fronteer Development Group Inc. (yayımlanmamış).
- Çağlar, K. Ö. (1948). *Türkiye Maden Suları ve Kaplıcaları Fasikül 2*. MTA Enstitüsü Yayınları.
- ÇÇŞİDİM, (2025). *Çanakkale İli 2024 Yılı Çevre Durum Raporu*. T.C. Çanakkale Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü (yayımlanmamış)
- Çelik, Ş. (2009). *Kumarlar (Çan-Çanakkale) kurşun-çinko cevherleşmesinin jeolojisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelmen, O., Elidemir, S. & Karadağlar, M. (2025). Update on the utilisation of geothermal energy for space and greenhouse heating in Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 177, 146-157. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1716476>
- Çetin, M. ve Taş, B. (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit. *TÜBAV Bilim*, 5(2), 28-46.
- Çınar, M. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2025). *Çanakkale Madenciliğinde Yeni Ufuklar: Teknoloji, Sürdürülebilirlik ve Stratejik Dönüşüm*. Holistance Publications. <https://doi.org/10.55094/holistence.537>

- Çiçek, M., Oyman, T. & Palmer, R. P. (2021). Variation of Cu, Fe, S and Pb isotopes in sulfides from hydrothermal mineralization from the Yenice region in Çanakkale, Biga Peninsula, NW Turkey. *Ore Geology Reviews*, 136, Article 104255. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104255>
- ÇLİ, (2026, 26 Mart). *Dekapaj*. TKİ Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü, Üretim Esasları. <https://cli.tki.gov.tr/dekapaj>
- Delaloye, M. & Bingöl, E. (2000). Granitoids from western and northwestern Anatolia: Geochemistry and modeling of geodynamic evolution. *International Geology Review*, 42(3), 241-268. <https://doi.org/10.1080/00206810009465081>
- Demirela, G. & Akiska, S. (2022). Evaluation of Pb isotope systematics and metal sources of the Biga Pb–Zn Province (NW Turkey) and comparison with the Pb isotope systematics of the Rhodope Massif. *Journal of African Earth Sciences*, 187, Article 104445. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104445>
- Deniz, O. (2010). *Çanakkale Çan Çevresindeki Jeotermal Sistemlerin Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelenmesi* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dewey, J. F. & Şengör, A. M. C. (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuous tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 84-92. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90%3C84:AASRCM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90%3C84:AASRCM%3E2.0.CO;2)
- Doerksen, G., Freudigmann, S., Pilotto, D., Rykaart, M., Abrahams, G., Simmons, G., Kirkham, G. & Gray, J. (2015). *Revised Preliminary Economic Assessment Technical Report Halilağa Project, Turkey* (Canadian National Instrument 43-101 Technical Report). JDS Energy and Mining Inc (yayımlanmamış).
- Doğdu, M. Ş. (2004). Jeotermal Suların Rezervuar Sıcaklığının Tahmininde Kullanılan Jeotermometre Hesaplamaları İçin Bilgisayar Programı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 28(2), 1-12.
- DSİ, (2026, 25 Mart). *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, İşletmedeki Baraj ve Göletler*. <https://bolge25.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/943>
- Durmaz, K., Demir, B. G. ve Akbulut, A. (2026). Dünya ve Türkiye açısından feldispat madenciliği ve ticareti. *Kuzey Ege Teknik Bilimler ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 64-74. <https://izlik.org/JA95LF95PT>
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Okay, A. İ., Şentürk, Y. ve Kar, H. (2012). Biga Yarımadası'nın Tersiyer Öncesi Jeolojisi. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 7-74). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Ediger, V. Ş. (1988). *Biga Yarımadası'ndaki Kömürlü Birimlerden Alınan Örneklerin Palinolojik Analizi* (Rapor no: 1296). Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Araştırma Grubu (yayımlanmamış).
- Eisenlohr, T. (1995). *Die Thermalwässer der Armutlu-Halbinsel (NW Türkei) und deren Beziehung zu Geologie und aktiver Tektonik* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. ETH Zurich.
- Ellis, A. J. (1979). Chemical geothermometry in geothermal systems. *Chemical Geology*, 25(3), 219-226. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(79\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(79)90143-8)
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Yıldırım, C. (2012). Biga Yarımadasının Diri Fayları ve Deprem Potansiyeli. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 163-198). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). *Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1:1.250.000*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara.
- Engin, T., Özkan, Y. Z., Sarı, R., Şen, P., Gedikoğlu, A. ve Özpeker, I. (2012). Biga Yarımadası'nın Metalojenisi. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 207-272). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- EPDK, (2026, Haziran). Elektrik piyasası sektör raporu: Nisan 2026. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-16382/2026-yili-nisan-ayi-sektor-raporlari-yayimlanmist>
- EPİAŞ, (2026, Haziran). Elektrik piyasası aylık raporu: Mayıs 2026. <https://www.epias.com.tr/spot-elektrik-piyasasi/elektrik-piyasasi-bultenler/elektrik-piyasasi-aylik-bulten/>
- Ercan, T., Satır, M., Steinitz, G., Dora, A., Sarıfakioğlu, E., Adis, C., Walter, H. J. ve Yıldırım, T. (1995). Biga Yarımadası ile Gökçeada, Bozcaada ve Tavşan Adalarındaki (KB Anadolu) Tersiyer

- Volkanizmasının Özellikleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 117, 55-86.
- Erdoğan, M., Gençoğlu, H. ve Mahmetoğlu, Y. (2012). Biga Yarımadası'nın Endüstriyel Hammadde Olanakları. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi*, (s. 273-288). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayın Serisi No: 28, Ankara.
- Eroğlu, A. ve Aksoy, N. (2003). Jeotermal suların kimyasal analizi. *VI. Ulusal Tesisat Kongresi, Jeotermal Enerji Semineri Kitapçığı* (s. 149-183). TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları.
- Ertin, G. (2001). Biga Yarımadasında Madencilik. *Coğrafya Dergisi*, 9, 81-108.
- ETKB, (2024). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Jeotermal*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-jeotermal> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2026)
- ETKB, (2025). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu*. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/TKDB/tr/Belgeler/Tu%CC%88rkiye_Kritik_ve_Stratejik_Madenler_Raporu.pdf (Erişim tarihi: 14 Şubat 2026)
- Flower, R. J. & Williams, D. M. (2025). Diatomites: Their formation, distribution and uses. In S. A. Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (3rd ed.), Vol. 2 (pp.: 50-61). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99931-1.00080-5>
- Fouillac, C. & Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratio in water applied to the geothermometry of geothermal waters. *Geothermics*, 10(1), 55-70. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(81\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(81)90025-0)
- Fournier, R. O. (1977). Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5(1-4), 41-50. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(77\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0375-6505(77)90007-4)
- Fournier, R. O. (1979). A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council*, 3, 221-224.
- Fournier, R. O. (1989). Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters. *UNU Geothermal Training Programme*, 10, 1-66.
- Fournier, R. O. (1991). Water geothermometers applied to geothermal energy. In F. D'Amore (Ed.), *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (pp. 37-63). UNITAR/UNDP Publications.
- Fournier, R. O. & Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1255-1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)
- Gedikoğlu, A. (2011). Biga Yarımadası metalik maden yatakları. *Biga Yarımadası'nın Jeolojisi Sempozyumu Bildirileri* (s. 48-62).
- Genç, Ş. C. (1998). Evolution of the Bayramic, magmatic complex, Northwestern Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 233-249. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00057-2)
- Genç, Ş. C., Dönmez, M., Akçay, A. E., Altunkaynak, Ş., Eyüpoğlu, M. ve Ilgar, Y. (2012). Biga Yarımadası Tersiyer Volkanizmasının Stratigrafik, Petrografik ve Kimyasal Özellikleri. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 121-162). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Ca-Mg geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Gjelsvik, T. (1962). Investigations of lead-zinc deposits in northwest Anatolia, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 59, 60-68.
- Grohol, M. & Veeh, C. (2023). *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report*. European Commission (yayınlanmış).
- Guo, Q., Liu, M., Luo, L., Yan, K., Guo, W., Wu, G., Yan, W. & Wang, Y. (2019). Geochemical controls on magnesium and its speciation in various types of geothermal waters from typical felsic-rock-hosted hydrothermal systems in China. *Geothermics*, 81, 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.006>
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020-2023. *Geothermal Energy*, 12, 14. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- Gürdal, G. (2011). Abundances and modes of occurrence of trace elements in the Çan coals (Miocene), Çanakkale-Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 87(2), 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.06.008>
- Gürer, Ö. F., Sanğu, E., Gürer, A. & Akın, M. (2021). Late Cenozoic shift from extension to strike-slip stress regime in the west of the Biga Peninsula,

- NW Turkey. *Journal of Structural Geology*, 148, Article 104348.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104348>
- Hedenquist, J. & Lowenstern, J. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
<https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Hezarfen, C. (1976). *Çanakkale-Çan Kömür Yatağı Fizibilite Araştırması* (Rapor no: 7113). Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü.
- IAH, (1979). *Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500.000*. International Association of Hydrogeologists, Paris, France.
- IARC, (2012). *Arsenic, Metals, Fibres and Dusts* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). International Agency for Research on Cancer. <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Arsenic-Metals-Fibres-And-Dusts-2012>
- IGF, (2023). *Women and the Mine of the Future Global Report. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development* (IGF).
<https://www.igfmining.org/resource/women-and-the-mine-of-the-future-global-report>
- Inzillo, B. M., Santoro, S., Zegeye, R. B., Tufa, R. A., Argurio, P., Straface, S. & Curcio, E. (2026). Geothermal fluids-derived critical raw materials for a sustainable and independent European supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 240, Article 117166. h
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117166>
- İleri, B. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2020). Metal removal from acid mine lake using ultrasound-assisted modified fly ash at different frequencies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, Article 185.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-8150-4>
- İTASHY, (2016). *İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*. Resmî Gazete, 20/10/2016, Sayı: 29863.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7510&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Jelen, J. (2018). Mining Heritage and Mining Tourism. *Czech Journal of Tourism*, 7(1), 93-105.
<https://doi.org/10.1515/cjot-2018-0005>
- Kahraman, S., Demirel, V., Beker, K., Gökmenoğlu, O. ve Zaman, U. (2005). *Çanakkale-Çan-Etili Sahası Jeotermal Enerji Aramaları, Eti-1 Kuyu Bitirme Raporu* (Rapor no: 10772). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi/Jeofizik Etütleri Dairesi (yayımlanmamış).
- Karaca, Z., Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A., Kamacı, C., Çetiner, Z. S., Erenoğlu, R. C. ve Akçay, Ö. (2013). *Çanakkale ili (Biga Yarımadası) Jeotermal Kaynakları ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Biga Yarımadası Jeotermal Bilgi Sistemi* (Proje no: DFD12/0011). Güney Marmara Kalkınma Ajansı (yayımlanmamış).
- Karadeniz, M. (2008). *Sülfürlü Madenlerin Sorunu Asit Maden Drenajı ve Çözümü* (Oda Yayın No: 146). TMMOB Maden Mühendisleri Odası.
- Kartal, T. (1974). *Çanakkale-Çan Kaplıcası Hidrojeoloji Etüdü* (Rapor no: 6649). MTA (yayımlanmamış).
- Kassem, M. A. & Moscariello, A. (2024). Advancing sustainable energy: A systematic review of geothermal-powered district heating and cooling networks. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1), Article 2417436.
<https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2417436>
- Ketin, İ. & Roesli, F. (1953). Makroseismische Untersuchungen über das nordwestanatolische Beben vom 18. März 1953. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 46(2), 187-208.
<https://doi.org/10.5169/seals-161697>
- Ketris, M. P. & Yudovich, Y. E. (2009). Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135-148.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- Koçyiğit, A. (2009). Biga Yarımadası'nın Yeni Tektoniği: Biga Fay Sistemi, KB Türkiye. 62. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, (s. 498-499).
- Körpe, R. (2024). Antik Çağ Troas Bölgesi Madenleri. 5. *Türkiye Tarihi Madenler Konferansı Bildiriler Kitabı*, (s. 20-26). Trakya Üniversitesi.
- KRDAE, (2026a, 25 Mart). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. *Türkiye'de 1900-2004 Yılları Arasında Can Kaybı ve Hasara Neden Olmuş Önemli Depremler (Ms>5.0)*. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Depremler/tlrange2.htm>
- KRDAE, (2026b, 25 Mart). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma

- Enstitüsü. 03 Mayıs 2018 Çan (Çanakkale) Depremi.* http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2018/05/03_05_2018_Can-Canakkale.pdf
- Krushensky, R. D., Akçay, Y. ve Karaeğe, E. (1980). Geology of the Karalar-Yeşiller area, northwest Anatolia, Turkey. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1461, 1-72. <https://doi.org/10.3133/b1461>
- Kuşcu, İ., Tosdal, R. M. & Gençaloğlu-Kuşcu, G. (2019). Episodic porphyry Cu (–Mo–Au) formation and associated magmatic evolution in Turkish Tethyan collage. *Ore Geology Reviews*, 107, 119-154. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.005>
- Kuznia, M. (2025). A review of coal fly ash utilization: Environmental, energy, and material assessment. *Energies*, 18, Article 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
- Kürçer, A., Özalp, S., Özdemir, E., Uygun Gündoğan, Ç. ve Duman, T. Y. (2019). 18 Mart 1953 Yenice-Gönen Depremi (Ms=7.2) ışığında Yenice-Gönen Fayı'nın aktif tektonik ve paleosismolojik özellikleri, KB Türkiye. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 159, 29-63. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.500553>
- Li, J., Sagoe, G. & Li, Y. (2020). Applicability and limitations of potassium-related classical geothermometers for crystalline basement reservoirs. *Geothermics*, 84, Article 101728. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101728>
- Li, J., Sagoe, G., Wang, X. & Yang, Z. (2021). Assessing the suitability of lithium-related geothermometers for estimating the temperature of felsic rock reservoirs. *Geothermics*, 89, Article 101950. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101950>
- Mancini, L. & Sala, S. (2018). Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>
- McKenzie, D. P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(2), 109-158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- McKenzie, D. P. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1), 25-32. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90071-7)
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş. & Başarır, N. (2021). Geothermal energy use: projections and country update for Turkey. *Proceedings, World Geothermal Congress 2021*, Reykjavik, Iceland, (s. 11).
- MGM, (2026, 25 Mart). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmî İstatistikler: İl ve İlçelerimize Ait İstatistikî Veriler (Çanakkale)*. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=CANAKKALE>
- MTA, (2026, 26 Mart). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Kömür Arama Araştırmaları*. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>
- Murray, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays*. Elsevier.
- Müller, G. (1955). *Çanakkale vilayetindeki termal kaynaklar* (Rapor no: 2221). Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı (yayınlanmamış).
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77844-5>
- ODAŞ, (2024). *Odaş Sürdürülebilirlik Raporu - 2024*. Odaş Elektrik Üretim Sanayi Ticaret A.Ş. <https://www.odas.com.tr/uploads/2025081918313935439.pdf>
- ODAŞ, (2025). *Odaş Sürdürülebilirlik Raporu - 2025*. Odaş Elektrik Üretim Sanayi Ticaret A.Ş. <https://www.odas.com.tr/uploads/20260722174828665.pdf>
- Okay, A. İ., Siyako, M. ve Bürkan, K. A. (1990). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2(1), 83-121.
- Okay, A. İ., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Monie, P., Metzger, R. & Akyüz, S. (1996). Paleo- and Neo-Tethyan events in northwest Turkey: Geological and geochronological constraints. In A. Yin & T.M. Harrison (Eds.), *Tectonics of Asia*, (pp. 420-441). Cambridge University Press.
- Okay, A. İ. & Satır, M. (2000). Coeval plutonism and metamorphism in a latest Oligocene metamorphic core complex in northwest Turkey. *Geological Magazine*, 137(5), 495-516. <https://doi.org/10.1017/S0016756800004532>
- Öktü, G., Uzel, Ö. F. ve Şaroğlu, F. (1991). *Çanakkale-Çan sıcaksu sondajları (Çan-1, Çan-2) kuyu bitirme raporu*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayınlanmamış).
- Önder, İ. (2002). *Çan jeotermal alanı sıcak su aramaları jeofizik rezistivite (DES) ve SP-türev etütleri raporu*. 10 s. (yayınlanmamış)

- Öngen, S. (1978). Petrographie und petrochemie des Çavuşlu-Karaköy granitoid massivs. *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Mecmuası Seri B*, 43, 93-115.
- Öngen, S. (1992). *Les échanges métasomatiques entre granitoïdes et encaissants particuliers (calcaires, dolomies, ultrabasites, séries manganésifères): l'exemple de la péninsule de Biga, Anatolie nord-ouest, Turquie* [Yayınlanmamış Doktora Tezi]. Université de Nancy, Faculté des Sciences de la Terre.
- Özalp, S., Kürçer, A., Özdemir, E. & Duman, T. Y. (2016). The Bekten Fault: The palaeoseismic behaviour and kinematic characteristics of an intervening segment of the North Anatolian Fault Zone, Southern Marmara Region, Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4), 347-362. <https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1208524>
- Özdamar, Ş. (2018). Evciler Plütunu'nun (KB Türkiye) Petrolojisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 149-165. <https://doi.org/10.17780/ksujes.392826>
- Özdamar, Ş., Roden, M. F., Zou, H., Billor, M. Z., Hames, W., Georgiev, S. & Dunkl, I. (2021). Petrogenesis of Oligocene plutonic rocks in western Anatolia (NW Turkey): Insights from mineral and rock chemistry, Sr-Nd isotopes, and U-Pb, Ar-Ar and (U-Th)/He geochronology. *Geochemistry*, 81(2), Article 125747. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125747>
- Özer, İ., Sağır, M., Baykara, İ., Dinçer, B., Koca Özer, B., Şahin, S., Eren, E. ve Özdemir, A. (2018). Çanakkale İlinde Paleolitik Dönem İnsan İzleri. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 58(1), 99-116. <https://doi.org/10.33171/dtcfjournal.2018.58.1.6>
- Özkaymak, C. & Sözbilir, H. (2012). Tectonic geomorphology of the Spildagi High Ranges, western Anatolia. *Geomorphology*, 173, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.003>
- Palmer, C. A., Tuncalı, E., Dennen, K. O., Coburn, C. T. & Finkelman, R. B. (2004). Characterization of Turkish coals: a nationwide perspective. *International Journal of Coal Geology*, 60, 85-115. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.05.001>
- Peiffer, L., Wanner, C., Spycher, N., Sonnenthal, E. L., Kennedy, B. M. & Iovenitti, J. (2014). Optimized multicomponent vs. classical geothermometry: Insights from modeling studies at the Dixie Valley geothermal area. *Geothermics*, 51, 154-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.12.002>
- Pernicka, E., Eibner, C., Öztunalı, Ö. & Wagner, G. A. (2003). Early Bronze Age metallurgy in the North-East Aegean. In G. A. Wagner, E. Pernicka & H. P. Uerpman (Eds.), *Troia and the Troad: Scientific Approaches*, (pp. 143-172). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05308-9_10
- Pickett, E. A. & Robertson, A. H. (2004). Significance of the volcanogenic Nilüfer Unit and related components of the Triassic Karakaya Complex for Tethyan subduction/accretion processes in NW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13 (2), 97-143.
- Piper, M. A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Rubio-Maya, C., Ambríz-Díaz, V. M., Pastor-Martínez, E. & Belman-Flores, J. M. (2015). Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 689-716. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>
- Rybár, P. & Hronček, P. (2017). Mining tourism and the search for its origins. *Geotourism*, 3, 50-51. <https://doi.org/10.7494/geotour.2017.50-51.3>
- Sánchez, M. G., McClay, K. R., King, A. R. & Wijbrams, J. R. (2016). Cenozoic crustal extension and its relationship to porphyry Cu-Au-(Mo) and epithermal Au-(Ag) mineralization in the Biga Peninsula, northwestern Turkey. In J. P. Richards (Ed.), *Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt*, (Special Publication No. 19, pp. 113-138). Society of Economic Geologists.
- Sarp, S., Burçak, M., Yıldırım, T. ve Yıldırım, N. (1998). *Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları ile Balıkesir-Havran-Derman kaplıca sahasının detay jeotermal etüdü ve gradyan sondajları* (Rapor no: 10537). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayınlanmamış).
- Schoeller, H. (1962). *Les Eaux Souterraines: Hydrologie Dynamique et Chimique. Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources*. Masson et Cie.
- Siyako, M., Bürkan, K. A. ve Okay, A. İ. (1989). Biga ve Gelibolu Yarımadılarının Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 1(3), 183-199.
- Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Softa, M., Tepe, Ç., Özkaymak, Ç. ve Baba, A. (2018). Çanakkale-Ayvacık Deprem Fırtınasının (14

- Ocak-20 Mart 2017) Sismik Kaynakları. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 1-17.
- Stober, I. & Bucher, K. (2021). *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development* (2nd ed.). Springer Nature Switzerland AG.
- Sütun Enerji, (2026, 26 Mart). *Sütun Enerji Madencilik A.Ş., Demir, Bakır ve Çinko Madenleri*. <https://www.sutunenerji.com/demir-bakir-cinko-madenleri>
- Swaine, D. J. (1990). *Trace Elements in Coal*. Butterworth & Co. London.
- Şanlıyüksel Yücel, D. (2013). *Asidik su kaynaklarının karakteristikleri, oluşumunu sağlayan faktörler ve hidrojeokimyasal özellikleri (Çan-Bayramiç; Biga yarımadası örneği)* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şanlıyüksel Yücel, D. (2019). Characterization and comparison of mine wastes in Can Coal Basin, northwest Turkey: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, Article 154. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8160-0>
- Şanlıyüksel Yücel, D. & Baba, A. (2013). Geochemical Characterization of Acid Mine Lakes in Northwest Turkey and Their Effect on the Environment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(3), 357-376. <https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7>
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve İleri, B. (2020). Antropojenik kaynaklı metal kirliliğinin çevresel etkilerinin azaltılmasında uçucu kül kullanımı. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(1), 43-56. <https://doi.org/10.25288/tjb.593416>
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve Yücel, M. A. (2017). Terk edilmiş kömür ocaklarında oluşan maden göllerinin hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve insansız hava aracı ile üç boyutlu modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 780-791.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Karaca, Z. & Yücel, M. A. (2013). Determining hydrogeochemical characteristics of geothermal resources in Biga Peninsula (city of Canakkale), NW Turkey. *40th International Association of Hydrogeologists Congress*, (p. 261). 15-20 September 2013, Perth, Australia.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A. & Baba, A. (2014). Change detection and visualization of acid mine lakes using time series satellite image data in geographic information systems (GIS): Can (Canakkale) County, NW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 72(11), 4311-4323. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3330-6>
- Şanlıyüksel Yücel, D., Balcı, N. ve Baba, A. (2016). Generation of acid mine lakes associated with abandoned coal mines in northwest Turkey. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(4), 757-782. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0270-z>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1987). *Türkiye'nin Diri Fayları ve Depremsellikleri* (Rapor no: 8174). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Şener, M. F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O. & Baba, A. (2023). The potential, utilization, and development of geothermal energy in Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171, 69-90. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1229381>
- Şengör, A. M. C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y. & Sungurlu, O. (1985). Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys. J. E. Dixon & A. H. F. Robertson (Eds.), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean* (pp. 77-112). Special Publication of Geological Society, Blackwell Scientific Publications.
- Şengör, A. M. C., Özeren, M. S., Keskin, M., Sakıncı, M., Özbakır, A. D. & Kayan, İ. (2008). Eastern Turkish high plateau as a small Turkic-type orogen: implications for post-collisional crust-forming processes in Turkic-type orogens. *Earth-Science Reviews*, 90(1-2), 1-48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.05.002>
- Şengüenalp, F. (2009). *Çan ilçe sınırları içerisinde yaşayan insanların kan ve saç As-Pb ve Hg değerlerinin yeraltı suları ile ilişkisinin tıbbi jeoloji açısından değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şimşek, Ş. (2002). Origin and characteristics of geothermal energy resource of the wider Aegean Region. *The International Workshop on Possibilities of Geothermal Energy Development*

- in the Aegean Islands Region (Proceed.), vol. 1, (pp. 1-8). Milos Island, Greece.
- Taymaz, T., Jackson, J. & McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03906.x>
- TEİAŞ, (2025, 10 Aralık). *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2024 Yılı İstatistikleri*. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Tekin, İ. (2009). *Çan taşı ekonomisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- TKİ, (2026, 30 Mart). *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. Ağaçlandırma Çalışmaları*. <https://www.tki.gov.tr/agaclandirma-calismalari>
- Toprak, S. & Demir, M. M. (2026). Subgram-scale precipitation of lithium peroxide from Tuzla geothermal brine using commercial λ -MnO₂ adsorbent in situ. *ACS Sustainable Resource Management*, 3(2), 433-443. <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.5c00481>
- Truesdell, A. (1976). Summary of section III: Geochemical techniques in exploration. *Proceedings 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*. U.S. Government Printing Office.
- Truva Bakır, (2026, 26 Mart). *Truva Bakır Maden İşletmeleri A.Ş., Bayramiç Bakır Madeni*. <https://truvabakir.com.tr/bayramic-bakir-madeni/>
- Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer, Z., Ayçık, H. ve Şahin, N. (2002). *Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları.
- TÜİK, (2025, 27 Aralık). *Türkiye İstatistik Kurumu. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2024*. <https://veriportali.tuik.gov.tr>
- UN General Assembly, (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations, New York.
- USGS, (2026a). *Mineral commodity summaries 2026* (Version 1.3). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf>
- USGS, (2026b). *Mineral commodity summaries 2026: Diatomite*. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-diatomite.pdf>
- Ünal Ercan, H. ve Ece, Ö. I. (2015). Hamamtepe sileks ocağının mineralojik, jeokimyasal ve kökensel irdelenmesi, Etili-Çanakkale. 68. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, (s.362-363). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Ünal Ercan, H., Ece, Ö. I., Çiftçi, E. & Aydın, A. (2022a). Comparison of epithermal kaolin deposits from the Etili area (Çanakkale, Turkey): Mineralogical, geochemical, and isotopic characteristics. *Clays and Clay Minerals*, 70(5), 753-779. <https://doi.org/10.1007/s42860-022-00214-4>
- Ünal Ercan, H., Ece, Ö. I., Schroeder, P. A. & Gülmez, F. (2022b). Characteristics and evolution of the Etili silica sinter epithermal deposits, Çanakkale-Turkey: Relation to alkali chloride vs acid-sulfate fluids. *Ore Geology Reviews*, 142, Article 104726. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104726>
- Ünalan, G. (2013). *Kömür Jeolojisi* (2. Baskı). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi-41.
- Verma, M. P. (2000). Chemical thermodynamics of silica: a critique on its geothermometer. *Geothermics*, 29(3), 323-346. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00064-4)
- Wagner, G. A., Pernicka, E., Seeliger, T. C., Öztunalı, Ö., Baranyi, I., Begemann, F. & Schmitt-Strecker, S. (1985). Geologische Untersuchungen zur frühen Metallurgie in NW-Anatolien. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 101-102, 45-81.
- Wang, D., Xue, F., Ren, L., Li, X., Wang, S. & Er, X. Q. (2025). Critical minerals in Tibetan geothermal systems: Their distribution, flux, reserves, and resource effects. *Minerals*, 15(1), Article 93. <https://doi.org/10.3390/min15010093>
- Wedding, H. (1966). *Çan Çanakkale kömür havzaları Çan Durali bölümünün detay harita çalışmaları hakkında rapor* (Rapor no: 4399). Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı (yayımlanmamış).
- Wei, Z. A., Shao, H., Tang, L., Deng, B., Li, H. & Wang, C. (2021). Hydrogeochemistry and geothermometry of geothermal waters from the Pearl River Delta region, South China. *Geothermics*, 96, Article 102164. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102164>
- Westaway, R. (1994). Present-day kinematics of the middle-east and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071-12090. <https://doi.org/10.1029/94JB00335>

- WHO. (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- World Bank, (2025). Turning Minerals and Metals into Development. <https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2025/12/12/turning-minerals-and-metals-into-development> (Erişim tarihi: 28 Mart 2026).
- Yalçın, T. (2007). Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey). *Aquatic Geochemistry*, 13(1), 75-93. <https://doi.org/10.1007/s10498-006-9008-2>
- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015). *Orman ve Su İşleri Bakanlığı*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150415-18.htm>
- Yılğör, A. (2001). *Çan (Çanakkale) yöresi sileks oluşumlarının jeolojisi ve endüstriyel yönden değerlendirilmesi* [Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, H. (2003). Exploration at the Kuscayiri Au (Cu) prospect and its implications for porphyry-related mineralization in western Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3), 133-150. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00274-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00274-1)
- Yılmaz, H., Yousefi, M., Parsa, M., Sönmez, F. N. & Maghsoodi, A. (2019). Singularity mapping of bulk leach extractable gold and -80# stream sediment geochemical data in recognition of gold and base metal mineralization footprints in Biga Peninsula South, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 153, 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.015>
- Yiğit, Ö. (2012). A prospective sector in the Tethyan Metallogenic Belt: Geology and geochronology of mineral deposits in the Biga Peninsula, NW Turkey. *Ore Geology Reviews*, 46, 118-148. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.015>
- Yurtsever, Y. & Gat, J. R. (1981). Atmospheric waters. In J. R. Gat & R. Gonfiantini (Eds.), *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*, (pp. 103-142). International Atomic Energy Agency.
- Yücel, M. A., Şanlıyüksel Yücel, D. ve Özer, İ. (2024). İnkaya Mağarası ve çevresinin (Çan, Çanakkale) insansız hava aracı termal ve RGB kamera görüntüleri ile modellenmesi. F. Yıldırım (Ed.), *37. Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (ss. 299-307). T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı.
- Yücel Öztürk, Y., Helvacı, C. & Satır, M. (2005). Genetic relations between skarn mineralization and petrogenesis of the Evciler Granitoid, Kazdağ, Çanakkale, Turkey and comparison with world skarn granitoids. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14(3), 255-280.
- Zhang, B., Wang, F., Wang, R., Shang, Y., Li, F., Li, M. & Wang, T. (2025). Geothermal lithium extraction technology: Research status and prospects. *Energies*, 18(12), Article 3146. <https://doi.org/10.3390/en18123146>