



AÇIK MADEN İŞLETMELERİNDE GEORADAR VE PİEZOMETRE VERİLERİ KULLANILARAK YATAY KUYU UYGULAMALARININ ENERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Arslan VEPAYEV^{1*}, Ozan DENİZ¹

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Enerji Kaynakları ve Yönetimi, Çanakkale, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Açık Ocak Madenciliği, Enerji Verimliliği, GeoRadar, Hidrojeoloji, Piyezometre, Yatay Drenaj Kuyusu, Yeraltı Suyu Yönetimi.</i>	Madencilik sektörü, yüksek enerji tüketimi ve kullanılan enerjinin büyük kısmının ticari kaynaklardan sağlanması nedeniyle enerji verimliliği çalışmalarında öncelikli bir öneme sahiptir. Bu çalışmada açık ocak madencilik faaliyetlerinde yeraltı suyunun uzaklaştırılması süreçlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla GeoRadar, piyezometre kuyuları ve yapısal jeoloji verileri kullanılarak yatay drenaj kuyularının optimum yerleşimleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan yöntemler arasında GeoRadar destekli deformasyon haritalaması, piyezometre verileriyle yeraltı su seviyelerinin izlenmesi ve yapısal unsurların detaylı haritalanması bulunmaktadır. Sahada uygulanan yatay drenaj kuyularının dikey pompa kuyularıyla karşılaştırmalı analizleri sonucunda, yatay kuyuların su tahliyesi için yaklaşık %60 daha düşük enerji tüketimi sağladığı ve birim su drenaj maliyetlerinin dikey kuyulara göre ortalama %40 daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, jeolojik ve hidrojeolojik analizler sonucunda yatay kuyuların, özellikle yüksek geçirgenliğe sahip fay breşleri bölgelerinde enerji ve maliyet açısından avantaj sağladığı ortaya konmuştur. Sonuç olarak, açık ocak madencilik işletmelerinde yatay kuyu uygulamalarının hidrojeolojik verilerle optimize edilmesinin, enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilir madencilik faaliyetlerine katkı sağlayabileceği gösterilmiştir.

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY IN HORIZONTAL WELL APPLICATIONS USING GEORADAR AND PIEZOMETER DATA IN OPEN PIT MINING OPERATIONS

Keywords	Abstract
<i>Energy Efficiency, GeoRadar, Groundwater Management, Horizontal Drainage Well, Hydrogeology, Open Pit Mining, Piezometer.</i>	The mining sector has significant importance in energy efficiency studies due to high energy consumption and the predominance of commercially sourced energy. This study aims to enhance energy efficiency in groundwater disposal processes in open pit mining operations by determining optimal horizontal drainage well placements using GeoRadar, piezometer wells, and structural geological data. The methodologies employed include GeoRadar-supported deformation mapping, monitoring groundwater levels using piezometer data, and detailed mapping of structural geology features. Comparative analyses between horizontal drainage wells and vertical pump wells demonstrated that horizontal wells provide approximately 60% lower energy consumption and around 40% reduction in unit water drainage costs. Additionally, geological, and hydrogeological analyses indicate that horizontal drainage wells offer particular energy and cost advantages in regions characterized by highly permeable fault breccias. Consequently, optimizing horizontal well placement based on hydrogeological data in open pit mining operations can significantly contribute to sustainable mining practices by reducing energy consumption.

Alıntı / Cite

Vepayev, A. ve Deniz, O., (2025). Açık Maden İşletmelerinde Georadar ve Piyezometre Verileri Kullanılarak Yatay Kuyu Uygulamalarının Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(4),1061-1077.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Vepayev / 0000-0003-4946-4917

O. Deniz / 0000-0002-9984-9893

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 25.06.2025

Revizyon Tarihi / Revision Date 28.08.2025

Kabul Tarihi / Accepted Date 26.09.2025

Yayın Tarihi / Published Date 30.12.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: arslanvepayev@gmail.com, +90-553-878-8718

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY IN HORIZONTAL WELL APPLICATIONS USING GEORADAR AND PIEZOMETER DATA IN OPEN PIT MINING OPERATIONS

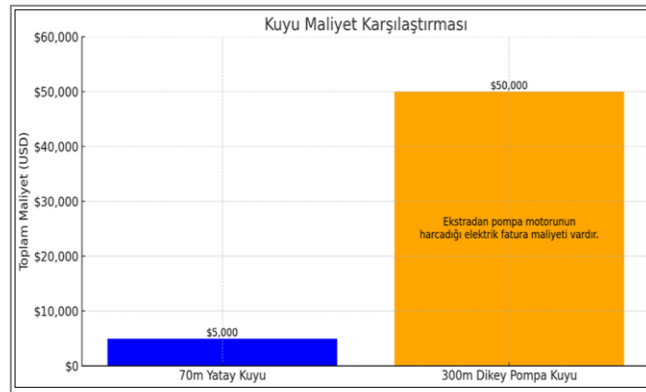
Arslan VEPAYEV^{1†}, Ozan DENİZ¹

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Enerji Kaynakları ve Yönetimi, Çanakkale, Türkiye

Highlights

- Horizontal wells consume 60% less energy than vertical wells.
- GeoRadar maps structural controls for optimized placement.
- Piezometers monitor groundwater response to drainage.
- Horizontal wells reduce unit water cost by about 40%.

Graphical Abstract



Şekil. Yatay ve dikey kuyu maliyetlerinin karşılaştırılması (Comparison of horizontal and vertical well costs)

Purpose and Scope

This study aims to improve energy efficiency in groundwater control within open pit mining operations by evaluating the performance of horizontal drainage wells using GeoRadar and piezometer data. The scope involves the integration of geological, structural, and hydrogeological data to optimize drainage design.

Design/methodology/approach

GeoRadar-assisted structural mapping, groundwater level monitoring via piezometers, and comparative performance analysis of drainage well types were used. The research combines field data with hydrogeological interpretation to assess energy consumption and drainage efficiency.

Findings

The results showed that horizontal wells consume approximately 60% less energy and reduce unit water drainage costs by 40% compared to vertical pumping wells. Their efficiency is particularly significant in fault breccia zones with high permeability.

Research limitations/implications

The study was conducted in a single mining site, which may limit broader generalization. Further research should focus on diverse geological settings and include long-term monitoring of energy performance.

Practical implications

The findings support the implementation of horizontal wells in similar mining contexts to reduce energy costs and improve drainage effectiveness. Results may influence mine dewatering strategies and operational energy management.

Social Implications

Improved energy efficiency in mining contributes to environmental sustainability. The approach can enhance corporate environmental responsibility and support policies aimed at reducing energy consumption in industrial operations.

Originality

This is one of the first studies to integrate GeoRadar and piezometer data for optimizing horizontal drainage wells from an energy efficiency perspective. The approach presents a novel methodology for sustainable mine dewatering design.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: arslanvepayev@gmail.com, +90-553-878-8718

1. Giriş

Enerji verimliliği, günümüzün küresel ölçekte karşılaştığı çevresel ve ekonomik sorunlara çözüm üretmede kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle enerjide dışa bağımlı ülkeler açısından, enerji yoğun sektörlerdeki tasarruf potansiyelinin doğru yönetilmesi sürdürülebilir kalkınmanın temel yapı taşlarından biridir. Bu sektörlerden biri olan madencilik gerek yüksek enerji tüketimi gerekse çevresel etkileri nedeniyle enerji verimliliği politikalarının odak noktası haline gelmiştir (Aydın, 2016; Akhan, 2022).

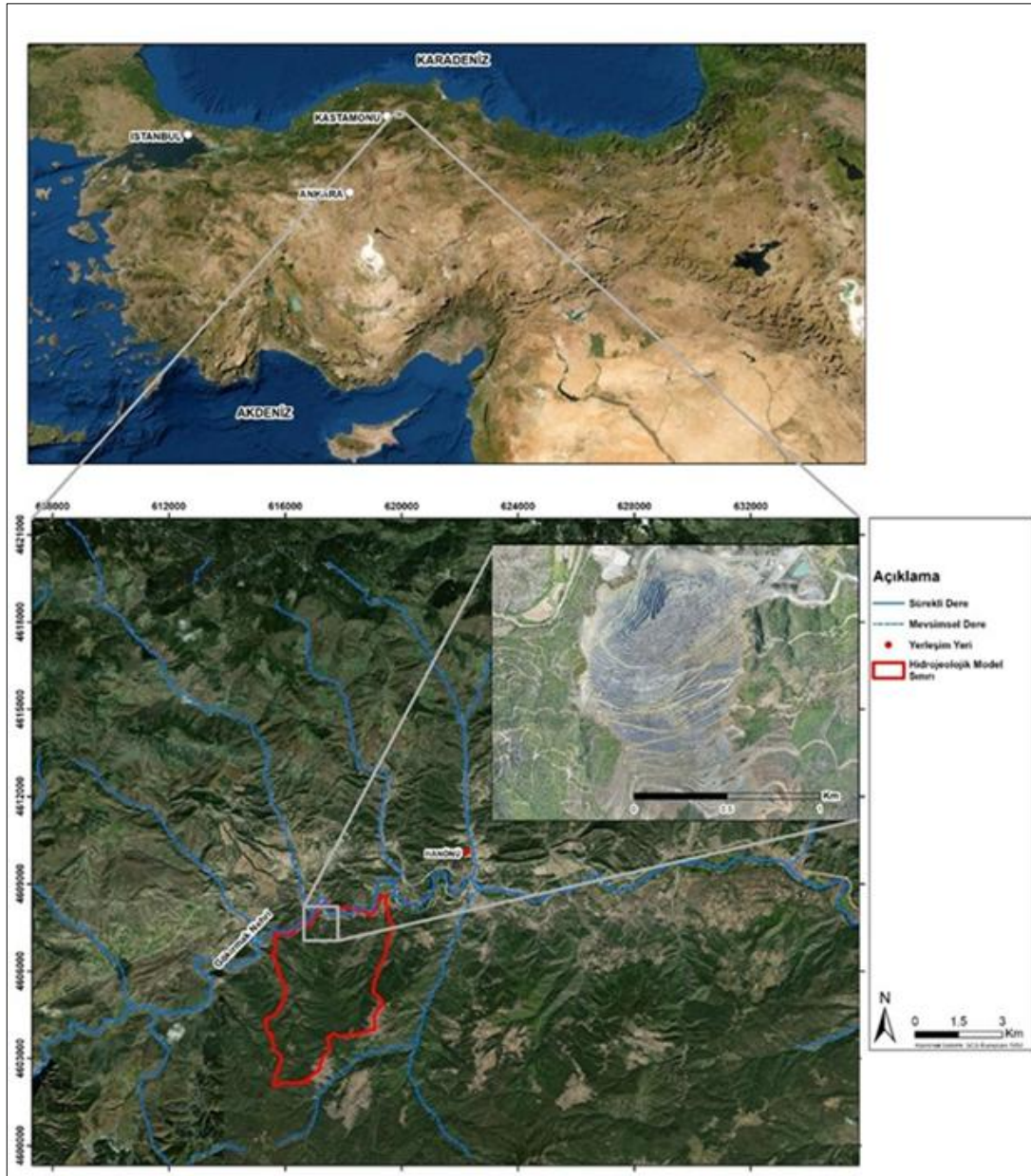
Açık ocak madencilik faaliyetlerinde karşılaşılan en önemli mühendislik sorunlarından biri yeraltı suyu sızıntılarıdır. Bu durum, özellikle tektonik olarak aktif, yapısal kırıklı zonlarda hem şev stabilitesini hem de üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Giderek artan su talebi ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, yeraltı suyunun yönetimi yalnızca operasyonel bir gereklilik değil, aynı zamanda çevre koruma yükümlülüğüdür. Bu kapsamda, yeraltı suyu hareketlerinin hidrojeolojik yaklaşımlarla modellenmesi ve uygun drenaj sistemlerinin tasarlanması kritik önemdedir.

Bölge özelinde değerlendirildiğinde, bu çalışmanın uygulama sahası Kastamonu ili, Hanönü ilçesinin kuzeydoğusunda yer almakta olup, Acacia Maden İşletmeleri tarafından yürütülen Gökırmak Açık Ocak sahasını kapsamaktadır. Çalışma alanının konumu ve topografyası, hidrojeolojik süreçlerin modellenmesinde belirleyici olan yüzey ve yapı ilişkilerinin okunmasına olanak sunar. Şekil 1’de çalışma alanının bölgesel yerleşimi, Şekil 2’de uydu görüntüsü üzerinden enerji ve drenaj hatlarıyla birlikte detaylı konum bilgisi, Şekil 3 ve Şekil 4’te ise mevcut hidrojeolojik kuyu dağılımı ve hat bağlantıları verilmiştir. Bu görseller, çalışmanın bölgesel hidrojeolojik kontekstini ortaya koymaktadır.

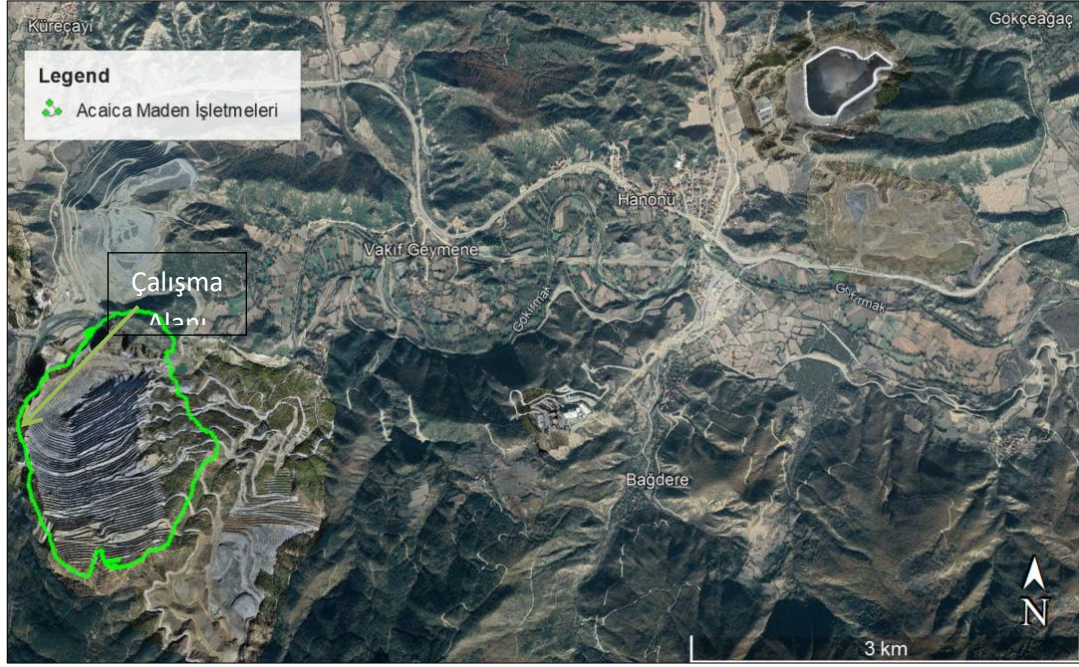
Literatürde, bölgede yapılan sınırlı sayıdaki hidrojeolojik çalışma (AECOM, 2017; Fugro, 2021; Rhino, 2021) genellikle geleneksel pompa kuyularının etkinliği ve yeraltı suyu seviyelerinin takibi üzerine odaklanmıştır. Ancak yatay drenaj kuyularının optimizasyonu, enerji tüketimi üzerindeki etkileri ve sistematik yer seçimi konularında bilimsel boşluklar mevcuttur. Bu çalışmada söz konusu boşlukları gidermek amacıyla, GeoRadar deformasyon haritaları, piyezometre kuyularından alınan basınç verileri ve yapısal jeoloji analizleri bir araya getirilmiş; açık ocakta enerji verimliliği çerçevesinde yatay drenaj kuyularının uygulanabilirliği irdelenmiştir.

Çalışmanın amacı, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine paralel olarak madencilik sektöründe yeraltı suyu yönetimine yönelik yenilikçi bir yaklaşım geliştirmektir. Bu kapsamda yatay kuyu sistemlerinin geleneksel dikey pompa sistemlerine kıyasla enerji tüketimi, maliyet ve operasyonel performans açısından avantajları teknik ve analitik olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir madencilik uygulamalarının yaygınlaştırılması adına önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Araştırmanın uygulama sahası, Kastamonu ilinin kuzeydoğusunda, Hanönü ilçesine yaklaşık 1,5 km mesafede konumlanmaktadır. Saha konumuna ait haritalar Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’te ayrıntılı olarak verilmiştir.



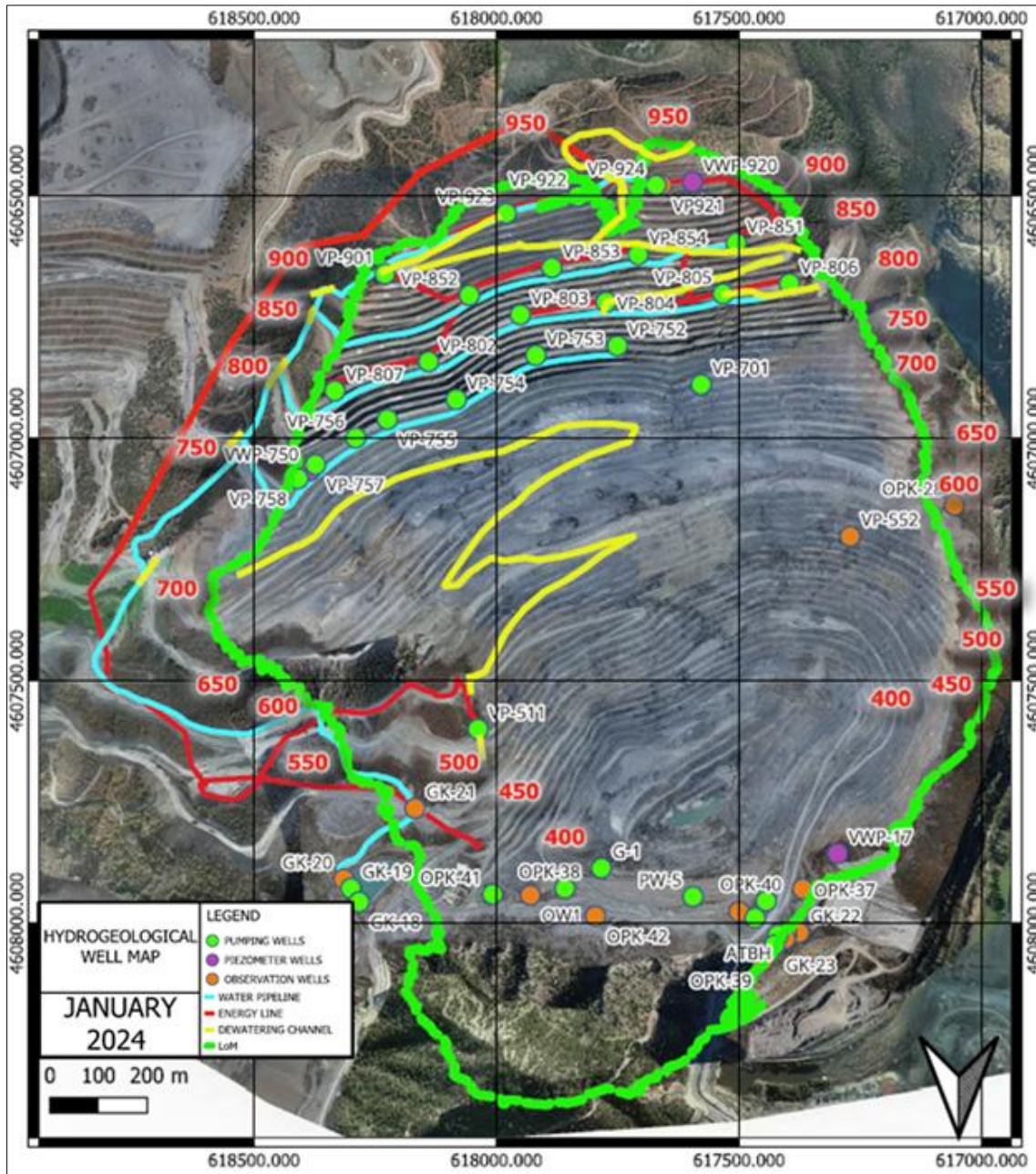
Şekil 1. Çalışma alanının genel yerleşim planı (General layout of the study area)



Şekil 2. Çalışma alanına ait uydu görüntüsü (Satellite images of the study area image)



Şekil 3. Gökırmak Açık Ocak sahasının genel görünümü (kuzeyden güneye bakış) (General view of the Gökırmak Open Pit Mine (view from north to south))



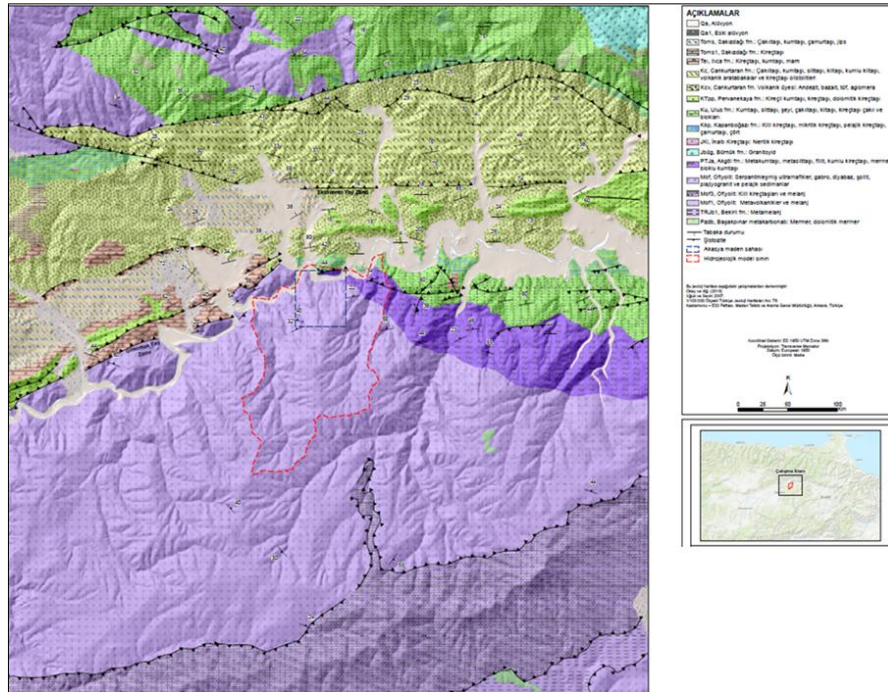
Şekil 4. Gökırmak Açık Ocak hidrojeolojik kuyu dağılım haritası (Gökırmak Open Pit hydrogeological well distribution map)

2. Açık Ocak Sahasının Jeolojik Özellikleri

Bölgesel Jeolojik Konum ve Litolojik Özellikler

Çalışma sahası, Kastamonu ili Hanönü ilçesi sınırları içerisinde yer alan Gökırmak açık ocak işletmesinde bulunmaktadır. Bölge, tektonik olarak Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kenarına yakın konumlanmış olup, Çangaldağ Metamorfik Kompleksi içerisinde yer alır. Bu kompleks, Orta Jura yaşlı metabazit, meta-andezit, fillit ve mermer gibi metamorfik birimlerden oluşmaktadır (Ustaömer ve Robertson, 1997; Çimen vd., 2016).

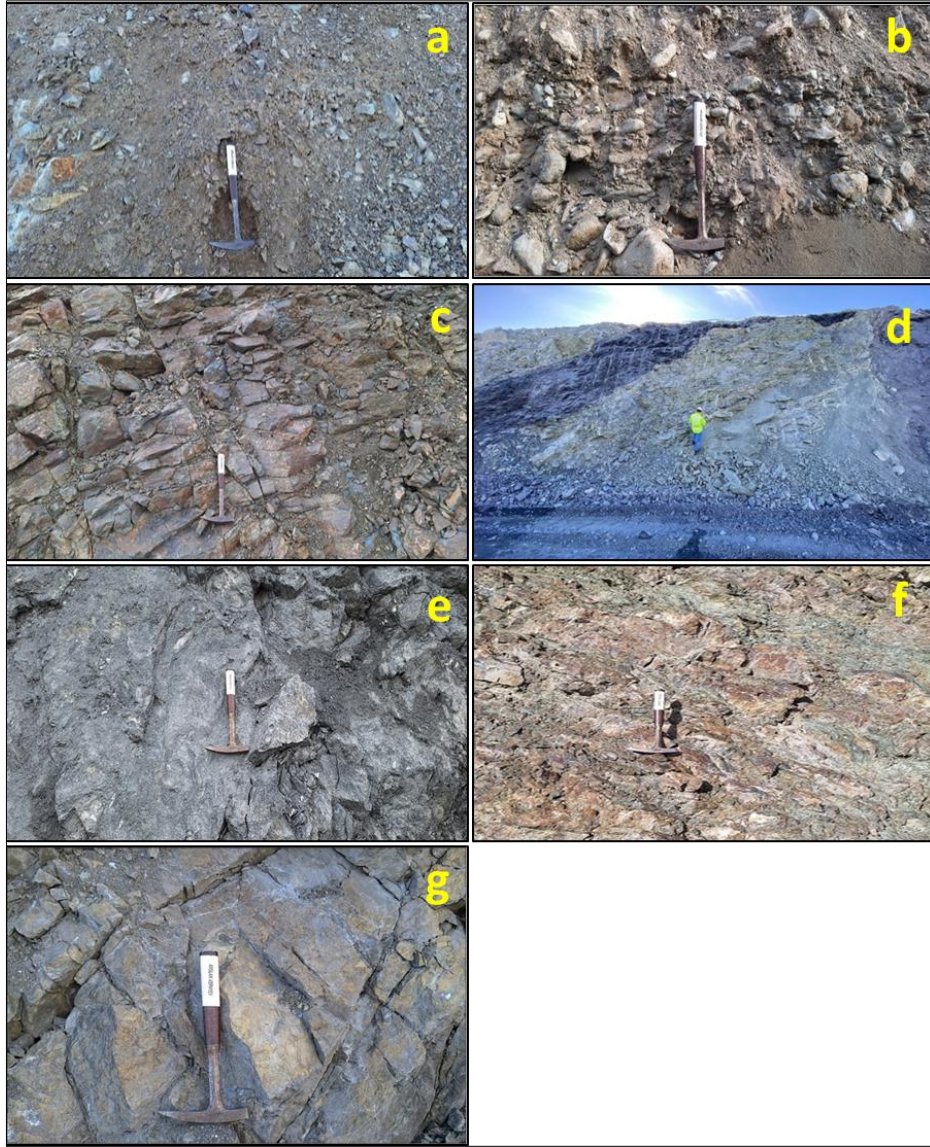
Geçmişte Paleotetis Okyanusu'nun kapanmasıyla ilişkilendirilen bu kompleks, son jeolojik haritalama ve radyometrik yaşlandırma çalışmalarıyla Neotetis Okyanusu havzası ile ilişkilendirilmiştir (Okay vd., 2014). Bölge genelinde yer alan yanal ve düşey değişim gösteren birimler; şist, fillit, grafitli şist ve yeşil şist gibi metamorfik kayalar ile yer yer silisleşmiş zonlar ve cevherleşmelerden oluşmaktadır. Maden ocağı, Çangaldağ antiklinalinin güney kanadında konumlanmakta olup, bölgeyi sınırlayan başlıca faylar Ekinveren Fayı (kuzeyde) ve Gökırmak Fayı'dır (güneyde) (Şekil 5).



Şekil 5. Maden ocağı yakın bölgesinin jeoloji haritası (Oğuz ve Sevin, 2007 ve Okay vd. 2016’dan değiştirilerek) (Geological map of the area near the quarry (modified from Oğuz and Sevin, 2007 and Okay et al. 2016))

Yüzeysel Jeolojik Birimler

Temeli oluşturan metamorfik birimleri, fillit ve şistler oluşturmaktadır. Fillitler, düşük dereceli metamorfizmanın bir ürünü olup özellikle açık ocağın güney kesimlerinde yüzeylenmektedir. Bu kayalar, başlıca mika, kuvars ve klorit minerallerinden oluşur. Belirgin bir yapraklanma (foliasyon) gösterirler ve bu özellikleri nedeniyle mühendislik projelerinde potansiyel olarak zayıf yüzeyler oluşturabilirler (Şekil 6 c). Birim içerisinde yaygın gözlenen şistler ise yeşil şist ve grafit şistler olarak ayrılmaktadır. Yeşil renkli klorit ve aktinolit mineralleri içeren, şistoz yapıda birimdir. Kaya kütle dayanımı açısından heterojen özellikler sergiler. Şistozite nedeniyle, kayma düzlemleri boyunca su hareketi ve stabilite riskleri artmaktadır (Şekil 6 d). Grafit şistler, içeriği nedeniyle hem iletkenlik hem de mekanik zayıflık açısından kritik birimlerdenidir. Fiziksel olarak koyu renkli, yağlı dokuda ve düşük kohezyonlu bir yapıya sahiptir. Yamaç stabilitesi ve su geçirimsizliği açısından dikkatle incelenmesi gerekir (Şekil 6 e). Şistler ise tipik olarak muskovit, klorit ve kuvars mineralleri içeren ve laminar yapı sergileyen şistler, sahada ayrılmış şekilde gözlemlenmektedir. Katmanlı yapısı nedeniyle erozyon ve ayrışmaya yatkın olup, özellikle açık ocak taban kesimlerinde stabilite açısından risk faktörü oluşturabilir (Şekil 6 f). Masif, yarı-masif ve düşük tenörlü bakır cevherleşmeleri bu birimde gözlemlenmektedir. Sülfür mineralleri, özellikle kalkopirit ve pirit, masif zonlarda belirgin şekilde bulunmaktadır. Yüksek kuvars içeriğine sahip silis kayaları oldukça kırılğan bir yapıya sahiptir. Gözeneklilik, sondaj karotu alımında zorluklara neden olmaktadır (Şekil 6 g).



Şekil 6 a) Açık ocağın doğusundaki döküntüden bir görünüm **b)** Gökırmak Nehri ile taşınan alüvyonun yakından görünümü **c)** Birbirine paralel bir dizi süreksizliğe sahip fillit jeolojik oluşumu **d)** Yeşil şistten karışık/grafit şiste geçiş zonu görünümü **e)** Karışık/grafit şistin plastik, kaygan dokulu bir mostra görünümü **f)** Açık ocak alanında bulunan ayrılmış bir şist mostrası **g)** Yüksek tenörlü cevherin mostra görünümü **(a)** View of the debris east of the open pit **b)** Close-up view of the alluvium transported by the Gökırmak River **c)** Phyllite geological formation with a series of parallel discontinuities **d)** View of the transition zone from green schist to mixed/graphite schist **e)** A view of the plastic, slippery texture of the mixed/graphite schist outcrop **f)** A view of a weathered schist outcrop in the open pit area **g)** A view of the high-grade ore outcrop)

Çalışma alanında, temel kayacı üzerine uyumsuzlukla alüvyonlar ve yamaç molozu gelmektedir. Yamaç Molozları, açık ocağın doğu kesimlerinde yaygın olarak gözlemlenen yamaç molozu, yerel topografik koşullar altında ana kayaların fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu oluşmuştur. Bu birim, Kuvaterner dönemine ait sedimanter malzemeler, blok, kum, çakıl ve silt içerikli gevşek yapıda oluşumlardan meydana gelir. Kalınlıkları yerel topoğrafyaya göre sırtlarda <5 m iken, doğu kesimde 10–40 m arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 6 a).

Alüvyonlar ise, Gökırmak Nehri'nin oluşturduğu alüvyonlar, ince-orta taneli malzemelerle zenginleşmiş, iyi yuvarlaklaşmış çakıl, kum, silt ve blok içerikleriyle karakterize edilir. Alüvyon birikimi yer yer 40 metreye ulaşmakta olup, geçirgenlik özellikleri bakımından drenaj ve temel stabilitesi açısından dikkatle analiz edilmelidir (Şekil 6 b).

Sahada yer alan fay zonlarında gözlenen breş yapılar, gevşek ve zayıf dokuları nedeniyle jeoteknik açıdan risk oluşturmaktadır. Bu alanlarda su geçirimsizliği ve örnek kayıpları yüksektir; bu nedenle mühendislik tasarımlarında bu faktörlerin mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

3. Kapsam ve Yöntem

Bu çalışmada, açık ocak madencilik sahalarında yeraltı suyu yönetimi süreçlerinin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda kullanılan yöntemler; deformasyon tespiti için GeoRadar teknolojisi, hidrojeolojik basınç analizleri için piyezometre kuyuları, yapısal jeolojik haritalama çalışmaları ve bu verilere dayalı yatay kuyu tasarımıdır.

3.1. GeoRadar ile Deformasyon Analizi ve Kuyu Yeri Belirleme

Çalışma alanında yer hareketliliği ve deformasyon eğilimleri, zemine yerleştirilen sabit GeoRadar sistemleri ile üç ay boyunca izlenmiştir. Bu sistemler, şev hareketleriyle ilişkili yüzey deformasyonlarını milimetre hassasiyetinde tespit edebilmektedir. Elde edilen deformasyon haritaları, özellikle şev altlarında deformasyonun arttığı bölgelerde, yatay kuyu konumlarının belirlenmesine temel veri sağlamıştır. Bu yöntemle belirlenen yatay kuyuların derinlikleri sahadaki litolojik özelliklere bağlı olarak 70 ile 100 metre arasında değişmektedir.

3.2. Piyezometre Kuyuları ve Hidrojeolojik Basınç Analizi

Alanda farklı lokasyonlarda toplam 11 adet piyezometre kuyusu açılmış ve üç aylık izleme verileri elde edilmiştir. Ölçümler, yeraltı su seviyelerinin yanı sıra, boşluk suyu basıncını da değerlendirmeye imkân tanımıştır. Piyezometrik veriler, yatay kuyuların açılacağı seviyelerin ve eğimlerinin belirlenmesinde temel rol oynamıştır. Bu veriler ışığında, eğimi $\leq 5^\circ$ olan ve su tablasının altına konumlandırılan yatay delikler planlanmıştır. Bu tasarım, yerçekimiyle çalışan pasif drenaj sistemlerinin uygulanmasına imkân tanımıştır.

3.3. Yapısal Jeoloji Haritalama Çalışmaları

Şev bölgesinde yapılan detaylı jeolojik haritalama ile fay, kırık-çatlak sistemleri, eklem setleri ve zayıf zonlar belirlenmiştir. Özellikle kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu fay zonlarının su taşıma kapasitesi yüksek olduğu için bu alanlara dik gelecek şekilde yatay kuyular önerilmiştir. Haritalama hem deformasyon hem de basınç verileriyle entegre edilerek, jeoteknik risk taşıyan zonlarda şev stabilitesinin korunması amacıyla yönlendirilmiştir.

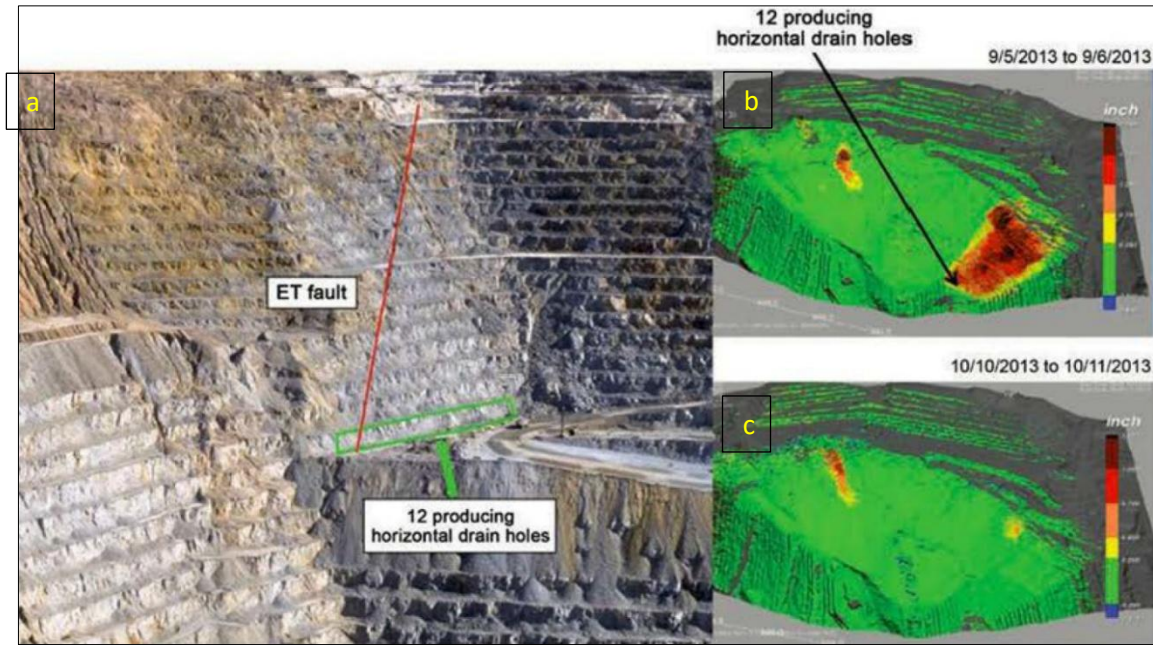
3.4. Yatay Kuyu Tasarımı ve Otomasyon Uygulaması

Yatay kuyuların tasarımında, uç kısımlara yerleştirilen uzaktan izlenebilir basınç sensörleri ve elektromekanik vanalarla entegre edilen bir kontrol sistemi uygulanmıştır. Bu sistem, kuyuların sadece belirli basınç seviyelerinde aktif hale gelmesini sağlamış ve böylece drenaj kapasitesi ile arıtma tesisi yükü dengelenmiştir. Filtreli çelik borular ile kuyu borulaması yapılmış, gelen suyun çimento yaka muhafazası ile dış yüzeyden boru aralarına sızması sağlanmıştır.

3.5. Deneme Kuyuları ve Maliyet Değerlendirmesi

Çalışma sahasında 5 adet pilot yatay kuyu açılmış ve üç ay boyunca izleme yapılmıştır. Ortalama olarak her bir kuyudan saniyede 1.3–2.2 litre arası su deşarj edilmiştir. Aynı hacimlerdeki suyu dikey pompa kuyularıyla boşaltmak için yaklaşık %45 daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağı hesaplanmıştır. Ayrıca, yatay kuyularda pompa sistemine gerek duyulmaması ve düşük işletme maliyeti ile önemli ekonomik avantaj sağlanmıştır. Kuyuların birim maliyeti ortalama 23.000–27.000 € arasında hesaplanırken, dikey kuyularda bu değer 35.000–42.000 € arasında değişmektedir.

Bu kapsamlı yöntem seti ile hem enerji verimliliği sağlanmış hem de çalışma sahasında şev stabilitesi korunarak operasyonel güvenlik artırılmıştır. Kullanılan tüm veriler; GeoRadar deformasyon haritaları, piyezometre ölçümleri ve yapısal harita analizleri entegre edilerek CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında işlenmiştir. Tüm analizler ArcGIS Pro 3.1 ve AutoCAD Civil 3D yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

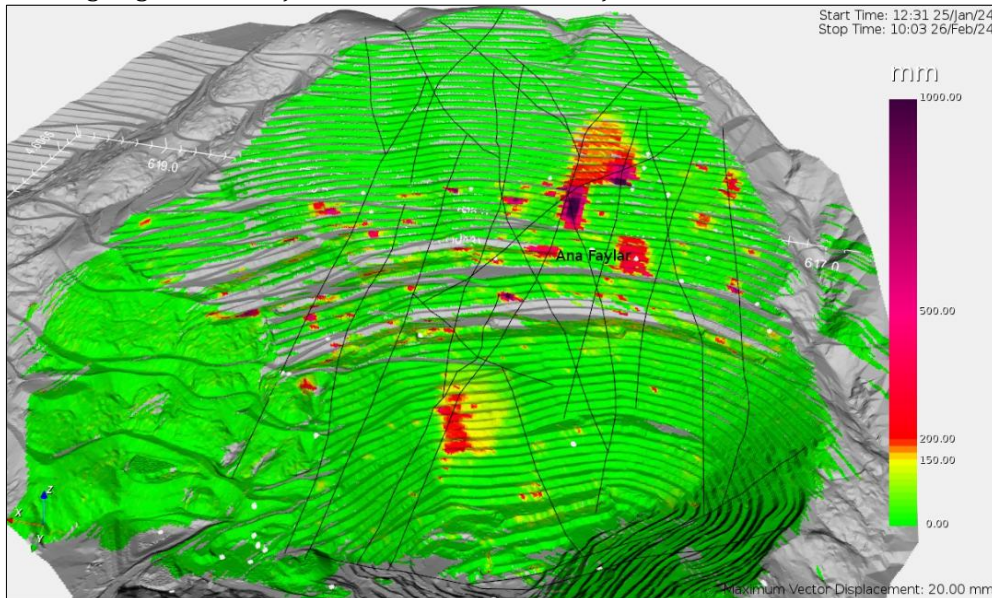


Şekil 7. GeoRadar deformasyon haritaları ve 12 adet yatay drenaj kuyusunun yerleştirildiği açık ocak kesiti (Beale, 2013)
(GeoRadar deformation maps and open pit section where 12 horizontal drainage wells were installed (Beale, 2013))

Şekil 7’de görüldüğü üzere, (a) Açık ocak güney duvarında yer alan ET fayı ve 12 adet üretimde olan yatay drenaj sondajlarının konumu. (b) 5–6 Eylül 2013 tarihleri arasında radar izleme verilerine göre güney duvar bölgesinde tespit edilen yer değiştirme alanları (kırmızı tonlar yüksek deplasmanı göstermektedir). (c) 10–11 Ekim 2013 tarihleri arasında aynı bölgede radar izleme verilerine göre yer değiştirme alanlarının azalması; yatay drenaj sondajlarının etkisiyle su basıncının ve deplasman hızlarının düşüşü tespit edilmiştir.

Kuyuların devreye alınmasının ardından, 10/10/2013–10/11/2013 tarihleri arasında yapılan ikinci ölçüm seti, deformasyonun önemli ölçüde azaldığını ve bölgenin stabil hale geldiğini göstermektedir. Harita üzerinde, daha önce kırmızı ve turuncu tonlarda yoğun deformasyonla ifade edilen bölgelerin renk spektrumunun yeşil ve maviye doğru kaydığı gözlemlenmektedir. Bu durum, yatay drenaj kuyularının etkili bir şekilde çalıştığını ve yeraltı suyu kaynaklı basıncın düşürülerek çevre stabilitesinin sağlandığını göstermektedir.

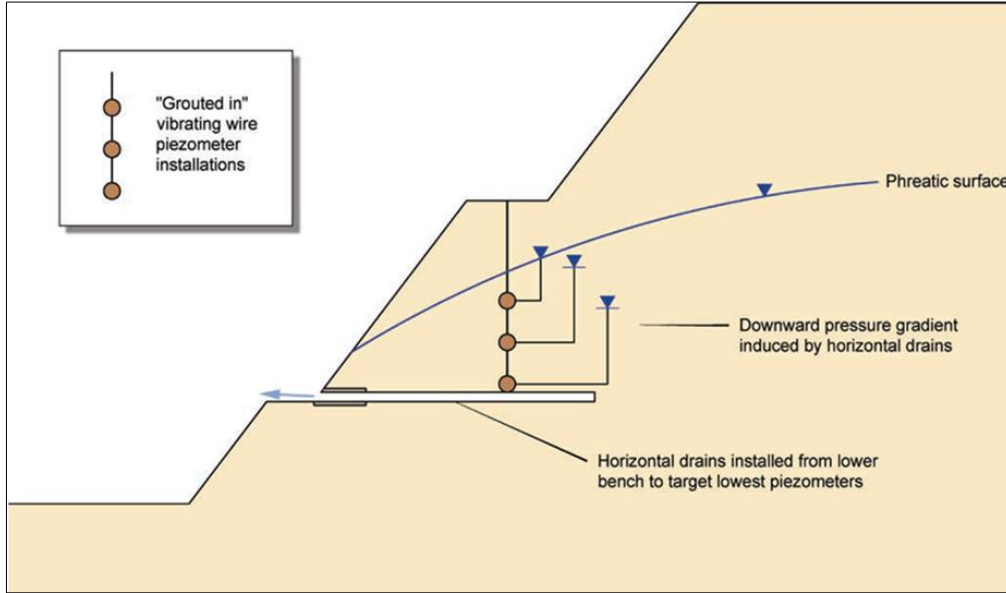
Bu uygulama, GeoRadar verileri ile sahadaki hidrojeolojik müdahalelerin entegre edilerek ne kadar hızlı ve etkili sonuçlar alınabileceğini göstermesi açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 8. Ana fay zonları ve yer değiştirme miktarlarını gösteren GeoRadar deformasyon haritası (2024 verisi) (GeoRadar deformation map showing main fault zones and displacement amounts (2024 data))

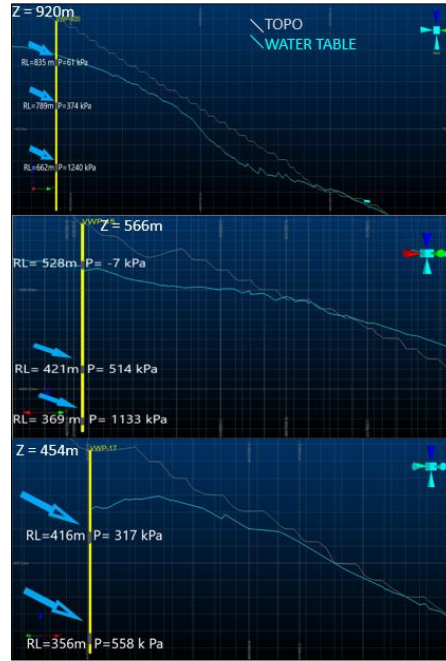
Şekil 8’de, 25 Ocak–26 Şubat 2024 tarihleri arasında Acacia Açık Ocak sahasında GeoRadar teknolojisiyle yapılan ölçümler sonucunda elde edilen deformasyon verileri sunulmaktadır. Dolayısıyla, bu saha verileri destekli deformasyon haritası, yatay drenaj kuyularının doğru konumlandırılması durumunda şev stabilitesini artırmakta ne kadar etkili olduğunu göstermekte ve önceki literatür bulgularını sahada doğrulamaktadır.

Bu harita, literatürde Beale (2013) tarafından sunulan Şekil 7’deki örnekle paralellik göstermektedir; ancak buradaki veriler doğrudan çalışma sahasına ait olup gerçek zamanlı izleme sonuçlarını yansıtmaktadır. Önceden belirlenen deformasyon zonlarına müdahale amacıyla açılan yatay drenaj kuyularının, özellikle ana fay zonları boyunca yeraltı su basıncını düşürerek deformasyon hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, bu saha verisi destekli deformasyon haritası, yatay drenaj kuyularının doğru konumlandırılması durumunda şev stabilitesini artırmakta ne kadar etkili olduğunu göstermekte ve önceki literatür bulgularını sahada doğrulamaktadır. Bu durum, çalışma kapsamında önerilen yatay drenaj stratejisinin hem teorik hem de pratik anlamda geçerliliğini desteklemektedir.



Şekil 9. Dikey piyezometre kuyusu ile yatay kuyu sisteminin karşılaştırmalı şematik gösterimi (Beale, 2013) (Comparative schematic representation of a vertical piezometer well and a horizontal well system (Beale, 2013))

Bu şematik diyagram, dikey olarak yerleştirilmiş titreşimli tel piyezometrelerin freatik yüzeyin eğimini izlemek için nasıl kullanıldığını ve yatay drenaj deliklerinin oluşturduğu basınç gradyanlarını göstermektedir. Yatay drenajlar, düşük kotlardan açılarak alt seviye piyezometreleri hedef alır ve yeraltı suyu basıncını azaltarak şev stabilitesine katkı sağlar (Şekil 9).



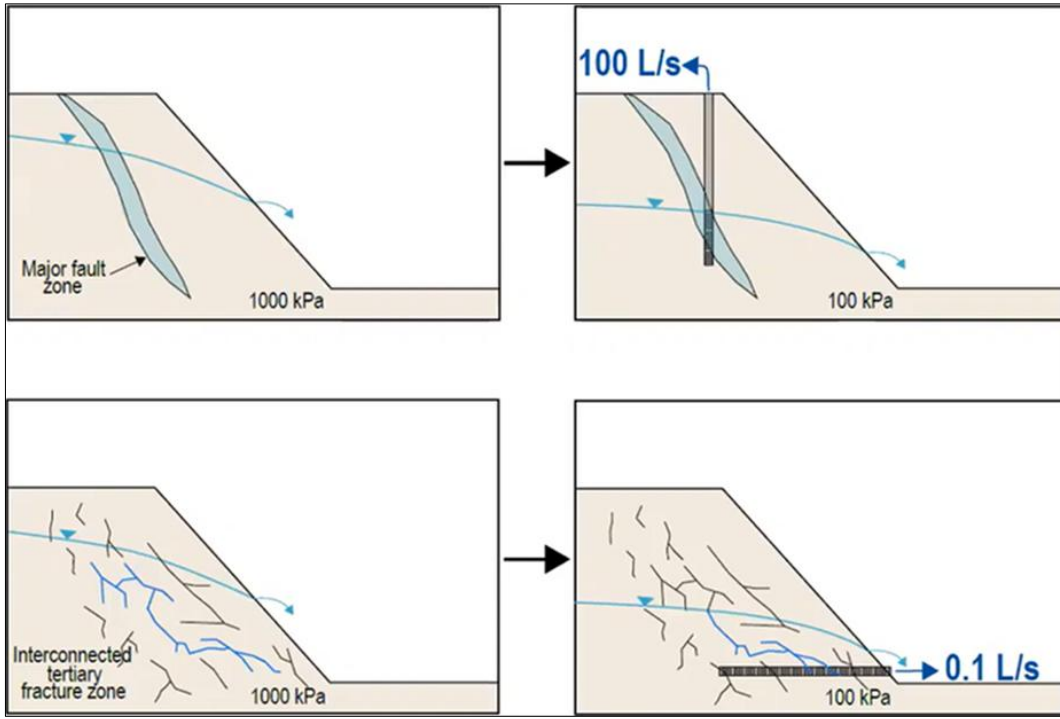
Şekil 10. Farklı derinliklerdeki piyezometrik ölçümlere göre yeraltı suyu basınç profilleri (Groundwater pressure profiles based on piezometric measurements at different depths)

Farklı derinlik ve konumlarda ölçülen piyezometrik veriler, yeraltı suyu basıncının şev boyunca nasıl değiştiğini ve yatay drenajla hangi seviyelerin hedeflendiğini ortaya koymaktadır. Bu veriler, yatay kuyu konumlandırmasının bilimsel temellerini oluşturur (Şekil 10).



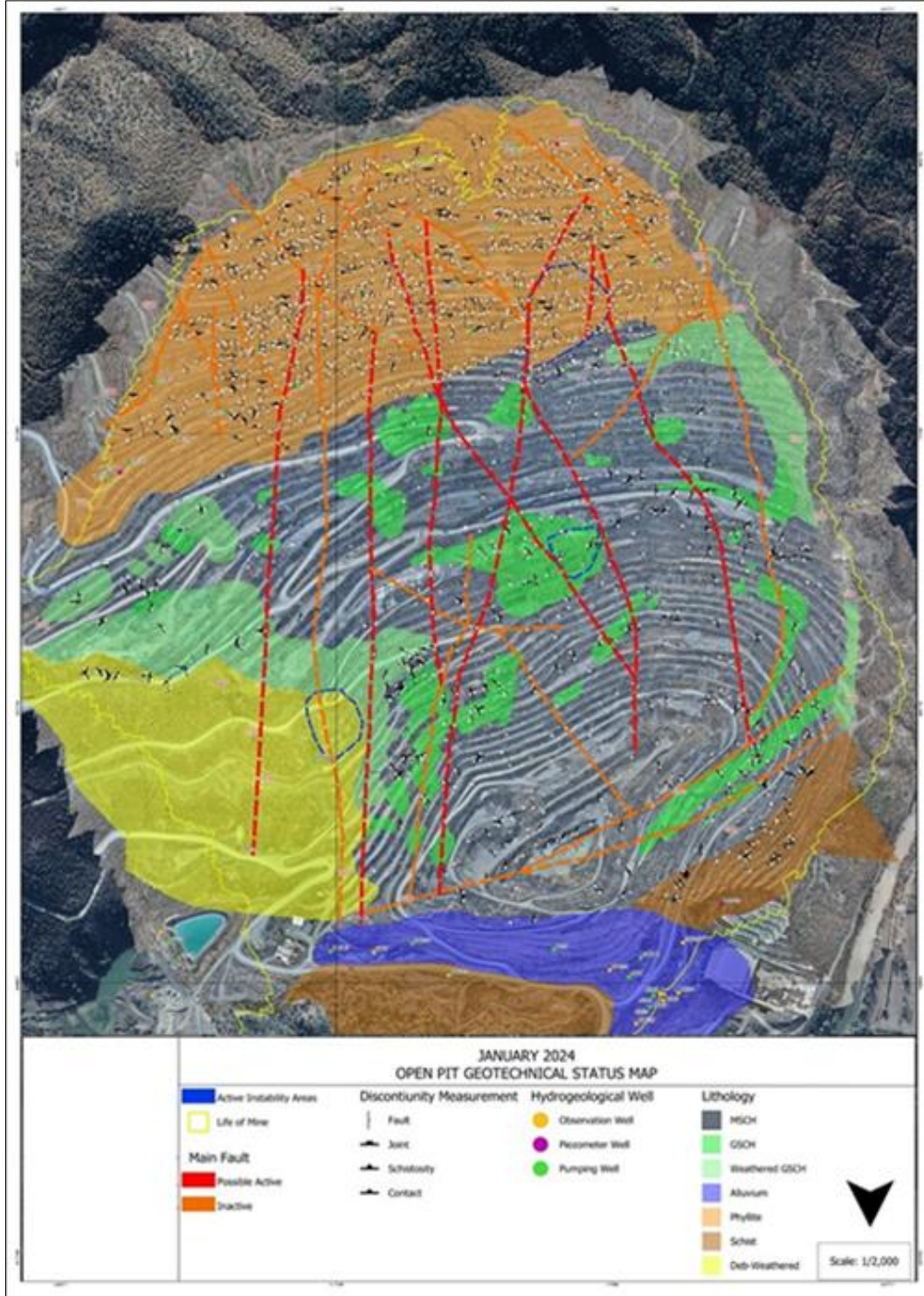
Şekil 11. Yatay kuyu açılmadan önce yüzeyde meydana gelen deformasyonlar (Deformations occurring on the surface before horizontal well drilling)

Sahada yatay drenaj kuyularının açılmasından önce, piyezometre verileriyle yüksek basınç belirlenen şev aynasında gözle görülür deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu durum, yeraltı suyu basıncının şev stabilitesine etkisini açıkça göstermektedir (Şekil 11).



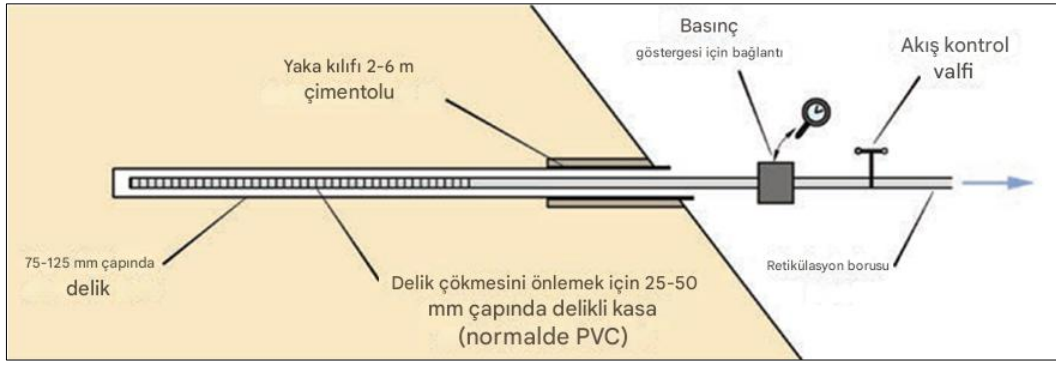
Şekil 12. Fay zonları boyunca su akış yolları ve kuyu yerlerinin belirlenmesi (Beale, 2013) (Determination of water flow paths and well locations along fault zones (Beale, 2013))

Şekil 12’de görüldüğü üzere, ana fay zonlarına yerleştirilen dikey pompa kuyuları ile yüksek debili (yaklaşık 100 L/s) su deşarjı sağlanabilmekte ve bu sayede yeraltı su basıncı 1000 kPa seviyesinden 100 kPa seviyesine düşürülebilmektedir. Ancak bu yöntem yüksek enerji ve maliyet gerektirirken, tali kırık ve çatlak sistemlerine yerleştirilen yatay kuyular aracılığıyla, çok daha düşük debilerle (yaklaşık 0.1 L/s) benzer düzeyde basıncısızlaştırma etkisi elde edilebilmektedir. Bu durum, drenaj yönteminin seçiminde yapısal jeolojinin belirleyici rolünü ortaya koymakta ve yatay kuyuların enerji verimliliği açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.



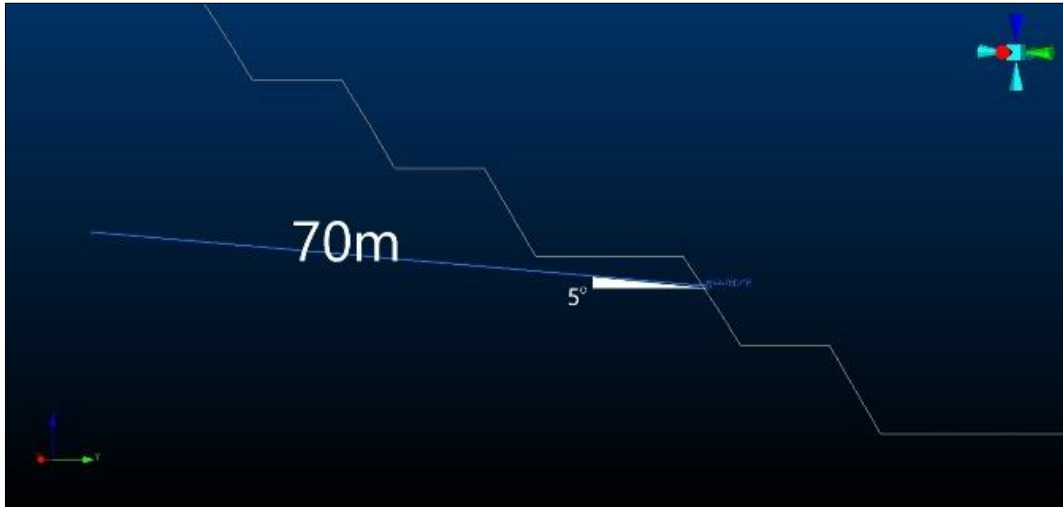
Şekil 13. Açık ocak sahasındaki aktif ve pasif fayların jeoteknik haritası (Geotechnical map of active and passive faults in the open pit area)

Şekil 13'deki detaylı haritada gözlenen ana ve tali fay hatları ile hidrojeolojik kuyuların konumlarını göstermektedir. Yapısal analizler, yatay kuyu uygulamalarında faylı bölgelerin hassasiyetini ortaya koymaktadır.



Şekil 14. Yatay kuyunun iç yapısı ve basınç kontrol mekanizması (Beale, 2013) (Internal structure and pressure control mechanism of horizontal wells (Beale, 2013) (şekillerin Türkçe şekli eklenmelidir)

Yatay kuyularda kullanılan basınç ölçer ve kontrol vanaları, yeraltı suyu basıncının belirli eşik değerlerinde otomatik deşarj edilmesini sağlamaktadır. Bu sistem sayesinde drenaj operasyonu tam kontrollü yapılır (Şekil 14).



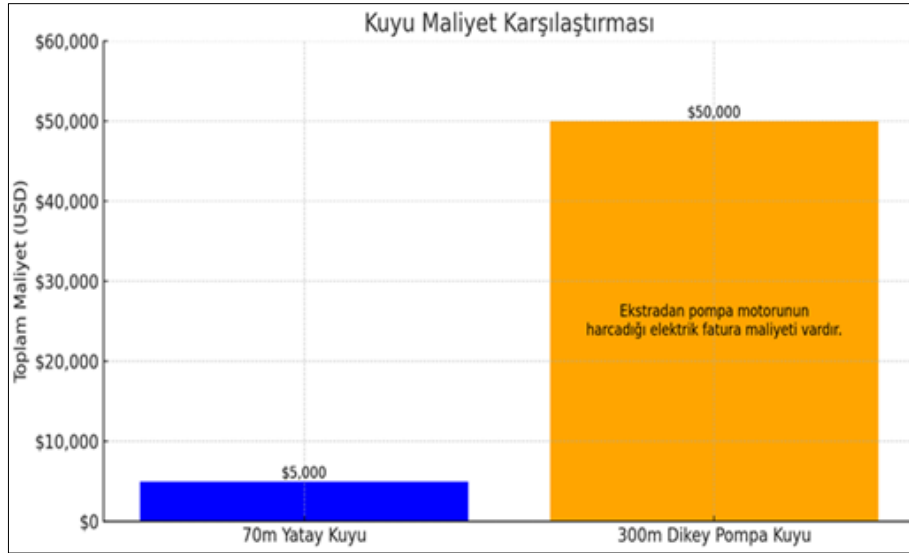
Şekil 15. 70 metre uzunluğunda ve 5° eğimli bir yatay kuyu örneği (A 70-meter-long horizontal well sample with a 5° inclination)

Yatay kuyuların eğimi, suyun kendi cazibesıyla akışına olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu görsel, modelleme sonuçları doğrultusunda açılmış örnek bir kuyuyu göstermektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Sahada kurulan yatay delgi makinesi ve yatay kuyudan gelen su örneği (Horizontal drilling machine set up in the field and water sample taken from horizontal well)

Sahada kullanılan bu modern delgi makinesi, yatay delgi işlemlerini yüksek hassasiyetle gerçekleştirmek üzere yapılandırılmıştır. Mobil tasarımı sayesinde zorlu saha koşullarında etkinlik sağlar (Şekil 17).



Şekil 17. Yatay ve dikey kuyu maliyetlerinin karşılaştırılması (Comparison of horizontal and vertical well costs)

Şekil 17’de sunulan karşılaştırmalı grafik, 70 metrelik bir yatay kuyu ile 300 metrelik bir dikey pompa kuyusunun toplam kurulum maliyetlerini göstermektedir. Yatay kuyular, metraj olarak daha kısa olmalarına rağmen, basınçsızlaştırma ve susuzlaştırma görevini sıfır enerji tüketimiyle gerçekleştirebilmekte; bu sayede hem operasyonel maliyetleri azaltmakta hem de şev stabilitesinin sağlanmasında etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu durum, yatay drenaj sistemlerinin enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından dikey pompa kuyularına kıyasla önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Enerji Verimliliği ve Teknik Karşılaştırma

Yapılan bu çalışmada, açık ocak madencilik faaliyetlerinde yatay drenaj kuyularının dikey pompa kuyularına kıyasla önemli teknik ve ekonomik avantajlar sunduğu belirlenmiştir. Sahada gerçekleştirilen uygulamalar neticesinde, 70 metrelik yatay kuyularla 3 ay boyunca ortalama 0.5–1.2 L/s arasında değişen su deşarjı elde edilmiştir. Bu debi değerleri, aynı alan içerisinde bulunan 300 metrelik dikey pompa kuyularının sağladığı ortalama 1–1.5 L/s değerlerine oldukça yakın olup, yatay kuyuların sadece cazibe kuvvetiyle çalışması nedeniyle enerji tüketiminin minimum düzeyde olması dikkat çekicidir.

Sayısal Veriler ve Şekillerle İlişkilendirme

Şekil 24’te gösterildiği üzere, yatay kuyuların toplam yatırım maliyeti yaklaşık 5.000 \$ iken, dikey pompa kuyuları için bu maliyet 50.000 \$ seviyesindedir. Ayrıca pompa motoru için harcanan elektrik giderleri, yıllık 8.000–12.000 \$ ek maliyet oluşturmakta, bu da enerji verimliliği açısından yatay kuyuların tercih edilebilirliğini pekiştirmektedir. Şekil 15–22 arasında sunulan görsellerde, piyezometrik basınç dağılımları, deformasyon bölgeleri ve yatay kuyu uygulamalarının bu alanlarda yarattığı etki açıkça görülmektedir.

Literatür Karşılaştırması ve Bilimsel Katkı

Benzer jeoteknik koşullarda yürütülen uluslararası çalışmalar (Beale, 2013; Smith et al., 2018) da yatay drenaj kuyularının hem şev stabilitesi hem de hidrostatik basınç kontrolünde etkin olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada, yerel jeolojik, hidrojeolojik ve yapısal verilerle desteklenen saha gözlemleri sayesinde, bu bulgular sayısal olarak doğrulanmıştır. Böylece literatürdeki teorik bilgiler, pratik uygulama sonuçları ile bütünleştirilmiş ve bölgesel ölçekte geçerliliği desteklenmiştir.

Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Yatay drenaj kuyularının kullanımına yönelik ileri düzey otomasyon sistemlerinin entegre edilmesi, su yönetiminde reaksiyon süresini azaltabilir ve drenaj optimizasyonunu artırabilir. Ayrıca, gelecekte yapılacak

araştırmalarda, yatay kuyuların farklı eğim, derinlik ve jeolojik birimlerdeki performanslarının karşılaştırmalı analizleri yapılmalıdır. Sayısal modelleme yazılımları (örneğin: SEEP/W, FLAC3D) ile kuyu etki zonları belirlenmeli ve optimizasyon algoritmaları ile kuyu yerleşimi iyileştirilmelidir.

Teşekkür

Çalışma süresince saha verilerinin toplanması, değerlendirilmesi ve teknik konularda sağladıkları katkılardan dolayı Acacia Maden İşletmeleri'ne teşekkür ederim.

Referanslar

- AECOM, 2017. Gökırmak Copper Project hydrogeological impact assessment. Ankara.
- Akbaş, B., Kaya, D., Eyidoğan, M., 2018. Bir otomobil montaj fabrikasının enerji tüketim analizi ve enerji tasarrufu potansiyelini değerlendirilmesi.
- Akhan, H., 2022. Sanayide enerji yönetimi: Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar. Alanlı, A., 2022. Türkiye'de enerji verimliliğine yönelik politikaların değerlendirilmesi.
- Aydın, M., 2016. Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi.
- Beale, G., Read, J., 2013. Guidelines for evaluating water in pit slope stability. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Bulgurcu, M.T., 2024. Ground control principles based on retrospective analyses from actual site conditions in open pit mining. Fugro, 2021. Gökırmak Copper Mine geological modelling. Ankara.
- Güçlü, B., Bayrakçı, H.C., Süzen, A.A., 2018. Elektrik sayaçlarının uzaktan okunması ve enerji analizi. Kaya, D., 2019. Demir çelik sektöründe enerji verimliliği.
- Kırbaş, İ., 2019. Binalarda enerji verimliliği uygulamaları: MAKÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi örneği.
- Mazor, E., 1991. Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. Great Britain: Open University Press.
- Oğuz, M.F., Sevin, M., 2007. 1/100 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları No: 76 Kastamonu – E32 paftası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Read, J., Stacey, P. (Edt.), 2009. Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Rhino, 2021. Acacia Maden A.Ş. açık ocak su yönetimi hidrojeolojik değerlendirme raporu. Ankara.
- Robertson, A.H.F., 2002. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan Region. Lithos, 65, 1-67.
- RPS, 2015. Asya Maden İşletmeleri A.Ş. Gökırmak Copper Project, Turkey, mine water management. Berkshire. Yıldız, A., Akgül, S., Güvercin, S., 2018. Enerji verimliliği ve sanayideki uygulamaları.