Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2018; 4(2): 192-209, DOI: 10.21324/dacd.415259

Atık Barajı Rezervuarı ve Cevher Stok Alanlarında Asit Maden Drenajı (AMD) Oluşumunun Değerlendirilmesi: Gümüşhane Örneği

Enver Akaryalı[1], Mehmet Ali Gücer[1,*], Selçuk Alemdağ[1]

[1]Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29000, Gümüşhane.

Özet

Doğal kaynakların kullanımı ile ilgili işlemlerin başında gelen madencilik faaliyetleri, işletmenin türüne ve büyüklüğüne bağlı olarak farklı boyutlarda gelişen çevresel etkilere ve bozulmalara neden olmaktadır. Bu etkilerin başında, madencilik faaliyetleri sırasında ve sonrasında ciddi ekolojik riskler oluşturan Asit Maden Drenajı (AMD) gelmektedir. AMD, sülfür içeren (özellikle pirit, pirotin ve kalkopirit) cevher atıkların, tipik olarak hava (oksijen) ve su içeren ortamlarda, yeraltı suyu, yağmur ve akıntı nedeniyle oksitleyici koşullara maruz kalması sonucu meydana gelen asit oluşumunu ifade etmektedir. Bu çalışmada, Gümüştaş Madenciliğe ait işletme sahası, cevher stok ve atık depolama alanlarında AMD oluşumunu belirlemeye yönelik işlemler yapılmış ve AMD gelişme potansiyeli ile muhtemel AMD gelişmesi durumunda alınacak tedbirler ortaya konmuştur. Maden işletme alanı, Eosen yaşlı andezit ve bazalt ile bu kayaçların piroklastitlerinden oluşan Alibaba Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Yapılan çalışmalarda pH değerleri tüm örneklerin I. sınıf kıta içi kaynak suyu özelliğinde olduğunu, macun pH ve sülfid (S^{-2}) değerleri ise maden işletme sahasında AMD potansiyelinin bulunmadığına işaret etmektedir. Ana ve iz elementlerin düşük mobiliteye sahip olması ise bu durumu destekler niteliktedir. Tüm örneklerde Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP) değerlerinin 20 kg $CaCO_3$/ton'dan ve Nötralizasyon Potansiyel Oranı (NPO) değerlerinin 2'den büyük olması da potansiyel asit üretmeyen karakterde olduğunu göstermektedir. S^{-2} değerlerinin çok düşük olması, söz konusu alanda kısa dönem içerisinde asit kaya drenajı potansiyeli gerçekleşmeyeceğini işaret etmektedir. Buna ek olarak, stok sahasını geçirimsiz hale getirmek için 50 cm kalınlığında geçirimsiz kil serilerek sıkıştırılmış, oluşan düşey profil sonlu eleman ağ sisteminde modellenerek su deşarjları belirlenmiştir. Yapılan tüm çalışmalar neticesinde maden işletme sahasında kısa sürede AMD oluşumu beklenmediği sonucuna varılmıştır. Ancak, maden işletme alanında, uzun sürelerde muhtemel AMD oluşumundan kaynaklanacak çevre kirliliği, yapılan çalışma kapsamında alınacak tedbirlerle önlenmiş olacaktır.

Anahtar Sözcükler

Asit Maden Drenajı (AMD), Ekolojik Riskler, Çevre Kirliliği, Gümüşhane, Sayısal Analiz

Assessment of Acid Mining Drainage (AMD) Formation in the Ore Stock and Waste Dam Reservoir Areas: An example of Gümüşhane

Abstract

The mining activities, one of the most important uses of natural resources, which causes environmental degradation and different effects depending on the mining operation type and size. At the beginning of these effects is acid mine drainage (AMD), which creates serious ecological risks on the environment both during operation and years after the mine is closed. AMD describes the formation of acid when sulphide-bearing (especially pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite) mine wastes are exposed to oxidising conditions, typically in the presence of air (oxygen) and water, due to groundwater, rain and run-off. In this study, processes have been carried out to determine the occurrence of AMD in the ore stock and waste storage areas of the Gümüştaş Mining. The potential of AMD development and measures to be taken have been determined in case of possible occurrence of AMD. The mine operation area was located on the Eocene aged Alibaba Formation, which consists of andesite, basalt and pyroclastics. The pH values in all samples indicate that they are class I. continental water resources quality and also the paste pH and sulphide (S^{-2}) values suggest that there is no AMD potential in the mine operation area. This is supported by low mobility of major and trace element contents. In all samples, Net Neutralization Potential (NNP) and (Neutralization Potential Ratio) NPR values higher than 20 kg$CaCO_3$/tone and 2 respectively, this indicate that the acid mining drainage don't formation in the area. Besides, AMD is not likely to occur in a short-term period according to very low S^{-2} values. In addition, compacted clay (50 cm thick) was laid in order to make impermeable in the stock area, and the resulting vertical profile was modeled in the finite element network system and water discharges determined. Consequently, all studies in the mining operation area show that the acid mining drainage formation was not expected in a short time period. However, in the area, environmental pollution caused by possible AMD for a long time will be prevented by measures to be taken.

Keywords

Acid Mining Drainage (AMD), Ecological Risks, Environmental Pollution, Gümüşhane, Numerical Analysis

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (456) 2331000 Faks: +90 (456) 2331075
E-posta: eakaryali@gmail.com (Akaryalı E), maligucer@gmail.com (Gücer M.A) selcukalemdag@gmail.com (Alemdağ S)

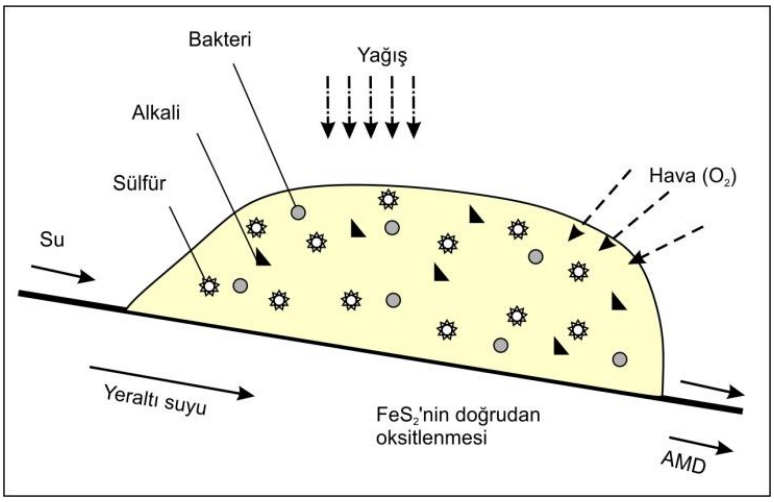
Gönderim Tarihi / Received : 14/04/2018
Kabul Tarihi / Accepted : 18/06/2018

1. Giriş

AMD genel olarak sülfürlü (temel olarak pirit, aynı zamanda pirotin ve kalkopirit) minerallerin atmosferik (su, oksijen, karbondioksit gibi) şartlar altında bazen de mikrobiyolojik organizmaların (örneğin *Acidophilic bacterium, Acidithiobacillus ferrooxidans*) katkısıyla hava (oksijen) ve su ile reaksiyona girerek kimyasal oksitlenmenin gerçekleşmesi ve geçtikleri litolojilerdeki bazı metalleri (Fe, Zn vb.) çözerek drenaj sularına asidik karakter kazandırması olayı olarak tanımlanmaktadır (Mills 1995; EPA 1994a; EPA 1994b; Akçil ve Koldaş 2006; Özçelik 2007; Şanlıyüksel Yücel 2013; Karadeniz 2008). Asit drenajının madencilik faaliyetleri sonucu oluşması durumunda AMD, doğada doğal yollarla meydana gelmesi durumunda ise asit kaya drenajı (AKD) olarak adlandırılmaktadır (Karadeniz 2008). Gelişen asidik sular, etkileşimde olacağı kayacın litolojik özelliklerine ve bu litolojilerdeki mineral yapılarına göre metal çözülümlerine ve sulardaki çözünmüş katı madde miktarlarındaki artışa sebep olabilmektedir. AMD, sülfür minerallerinin oksitlenmesi olduğundan, bu süreç doğal aşınma, ayrışma ve bozuşmalar sonucu oluşabileceği gibi (hiçbir insan etkisi olmaksızın), antropojenik aktivitelerden (madencilik, karayolu inşaatı, doğal tehlikelerden korunma amaçlı şev kırma veya düzeltme, vb.) de kaynaklanabilmektedir. AMD oluşumuna birçok kimyasal süreç sebep olabilmekle birlikte, pirit oksitlenmesi oluşumundaki en büyük etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte özellikle açık işletmelerde sülfürik asit oluşumu sonucu açığa çıkan demir sülfat, üç değerli hale geçerek oksitlenmekte ve demir hidroksit açığa çıkmaktadır. AMD oluşumunda pek çok karmaşık kimyasal reaksiyon dizisi cereyan etmekle birlikte, açığa çıkan üç değerli demir sülfat, asit veya nötr ortamda duraysız aynı zamanda da oksitleyici olduğundan, ortamdaki başta pirit olmak üzere tüm birincil sülfür minerallerini çözmeye çalışır.

Su ile birlikte havanın varlığı sonucu sülfür mineralinin oksitlenmesinin yanında, su ile birlikte ferri demirin de varlığı sülfür minerallerinde oksitlenmeye sebebiyet verebilecektir. Buna göre suyun yanında hem hava hem de ferri demir oksidant (oksitleyici) madde olarak sülfür minerallerinde oksitlenmeye ve asit üretimine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, sülfür minerallerini oksidant maddeye göre sınıflandırılması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Reaksiyonlar sonucu ortamda açığa çıkan hidrojen iyonları karbonat ve silikat minerallerini tetikleyerek asit oluşumunu tamponlayan (nötürleştiren) reaksiyonları oluşturabilir. Bu reaksiyonların devamlılığı, ortamdaki nötürleştiren minerallerin miktarı ile ilgilidir. Maden işletmelerinde (işletme ve cevher stok sahaları) pasa, cevher veya kayaç yığınlarında sülfür minerallerinin oksitlenmesi AMD oluşumuna sebep olabilmekte ve bu kaynaklardan doğan sızıntılar ile asit drenajı gelişebilmektedir (Şekil 1).

Son yarım asırlık dönemden bu yana günümüzdeki teknolojik gelişmelerin hızla yayılması ile birlikte, daha önceleri çoğunluğunun küçük ölçekte ve yüzeye yakın konumda olduğu açık işletmeler yerini daha büyük açık ve kapalı madencilik faaliyetlerine bırakmıştır. Özellikle devasa kazı makinelerinin keşfi ile düşük tenörlü ve derinlerde yataklanmış madenlerin işletilebilir hale gelmesini sağlayan teknolojik gelişmeler, daha geniş madencilik faaliyetlerinin doğmasında etkili rol oynamıştır. Dolayısıyla, bu gelişmelere paralel olarak çevresel sorunlardaki artışlar da kaçınılmaz olmuştur. Bu nedenle, Dünya'da son 40, ülkemizde ise son 15 yıldır, başta sülfürlü madenler olmak üzere birçok maden işletme alanında AMD oluşumu sorgulanmaya başlanmıştır (Karakaş vd. 2003; Yörükoğlu ve Karadeniz 2003; Karadeniz 2005; Balcı vd. 2006; Çiftçi ve Akçıl 2006; Balcı vd. 2012; Karadeniz 2011; Karapınar ve Kalyoncu Ergüler 2012; Şanlıyüksel Yücel ve Baba 2013; Anıl 2014; Delibalta vd. 2016). Bu çalışma kapsamında ise, maden işletmeciliği açısından oldukça aktif olan ve birçok maden sahasını bünyesinde barındıran Gümüşhane ilinde, Gümüştaş Madenciliğe ait maden işletme sahası, cevher stok ve atık depolama alanlarında AMD oluşumunu belirlemeye yönelik işlemler yapılmış ve AMD gelişme potansiyeli ile muhtemel AMD gelişmesi durumunda alınacak tedbirler ortaya konmuştur.

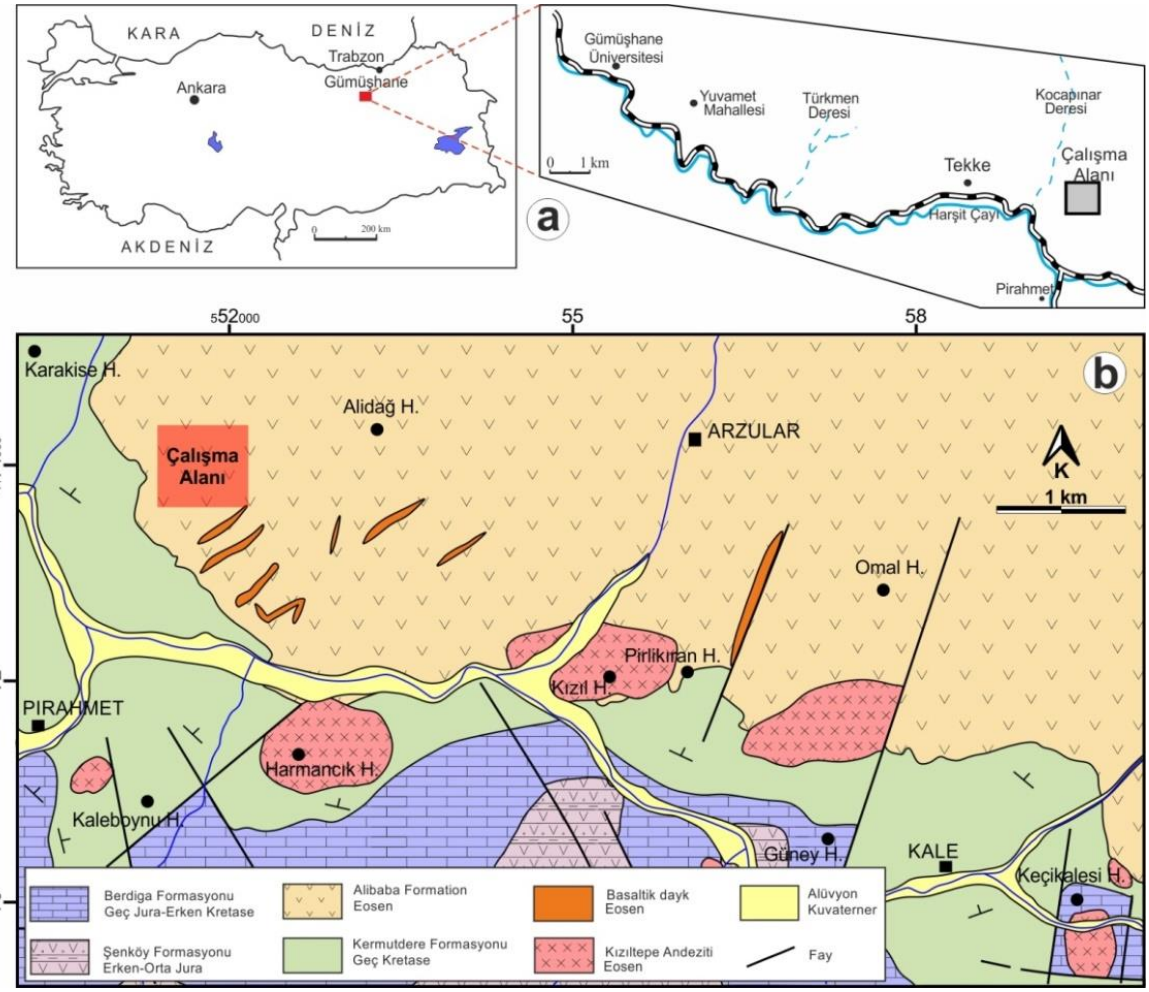


Şekil 1: Maden sahasında Sülfür minerallerinin oksitlenmesi sonucu AMD oluşumunun şematik gösterilimi (BCAMDTF 1989; Lottermoser 2010)

2. İnceleme Alanının Jeolojisi

Avrupa kıtasının doğu kesimlerinden itibaren başlayarak, Orta Asya'ya ve oradan da Pasifik'e kadar geniş bir alan boyunca uzanan Alp-Himalaya orojenik kuşağı, bünyesinde farklı tip ve ekonomide cevherleşme alanları içermektedir. Ülkemizde ise Doğu Pontidler olarak adlandırılan ve Alp-Himalaya metalojenik kuşağın önemli bir parçası konumunda olan Doğu Karadeniz bölgesi, çok sayıda ve farklı tiplerde ekonomik cevherleşme içermesi ile karakteristiktir. Dolayısıyla, volkanizma ile ilişkili masif sülfit yatakları, skarn ve porfiri Cu, Au, Mo yatakları, skarn ve epitermal damar tipi Cu, Pb, Zn, Au ve Ag yatakları başta olmak üzere çok sayıda ve farklı tiplerde maden yatakları gözlenmektedir (Güven 1993; Tüysüz vd. 1994; Tüysüz 1995; Tüysüz 2000; Lermi 2003; Demir 2005; Demir vd. 2008; 2013; Akaryalı 2010; Sipahi 2011; Akaryalı ve Tüysüz 2013; Maden ve Akaryalı 2015; Akaryalı ve Akbulut 2016; Akaryalı 2016; Sipahi vd. 2018). Bununla birlikte, cevherleşmenin çoğunlukla gözlendiği Eosen volkanitleri Gümüşhane yöresinde yaygın olarak yüzeyleme vermektedir (Arslan vd. 1997; Arslan vd. 2000; Arslan ve Aliyazıcıoğlu 2001; Aslan 2010; Alemdag 2015; Şahin ve Kaygusuz 2016; Gücer vd. 2017).

Çalışma konusunu oluşturan maden sahası, Gümüşhane il merkezinin yaklaşık 10 km doğusunda bulunan Tekke Beldesi'nin kuzeydoğu kesiminde yer almakta ve şehir merkezinin içerisinden geçen Harşit Çayı'na yakın bir konumda bulunmaktadır (Şekil 2a). İnceleme alanının temelini Geç Karbonifer yaşlı Gümüşhane Granitoyid Kompleksi oluştururken (Gürocak vd. 2017; Bostancı vd. 2018), onun üzerine uyumsuz olarak yerleşmiş olan Erken-Orta Jura yaşlı Şenköy Formasyonu ve üzerine uyumlu olarak gelen Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga kireçtaşları oluşturmaktadır. Sahada bu birimler üzerine Geç Kretase yaşlı Kermutdere Formasyonu gelmektedir. Madencilik faaliyetleri kapsamında işletilmekte olan cevherli alan ise Eosen yaşlı andezit ve bazalt ile bu kayaçların piroklastitlerinden oluşan Alibaba Formasyonu içerisinde gözlenmektedir. Tüm bu birimler Eosen yaşlı Kızıltepe Andeziti ile bazik dayklar tarafından kesilmektedir (Şekil 2b). Cevherleşmeler, çalışma alanında geniş yüzeyleme alanları veren Alibaba Formasyonu'nun andezitleri içerisinde gelişmiştir.



Şekil 2: a) Çalışma alanının yerbulduru haritası b) Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Eyüboğlu vd. 2013'den değiştirilerek)

3. Materyal ve Metot

Yapılan çalışma kapsamında, Gümüştaş Madencilik Tic. A.Ş. (Gümüşhane)'nin işletme sahası, cevher stok ve atık depolama alanlarında, AMD oluşum potansiyelini belirlemek amacıyla, 10 adet yan kayaç ve 10 adet cevherli olmak üzere toplam 20 adet örnek alınmıştır. (Şekil 3). Yan kayaç örnekleri stok sahasının temel birimlerini oluşturan andezit, bazalt ve andezitik aglomeralardan alınmış olup, örneklemeler yüzeyden itibaren 1-2 m derinliklerden yapılmıştır (Şekil 4). Cevherli öreklerde ise 5 tanesi (G1-G5) stok sahasındaki cevher minerallerini içeren kayaçlardan, 5 tanesi ise (A1-A5) zenginleştirme işleminden sonra atık havuzuna gönderilen cevherli atık malzemeden alınmıştır.

Şekil 3: Örnekleme noktalarının uydu haritası üzerindeki gösterimi

Şekil 4: Stok sahasının zemininden örneklenen yan kayaçların (andezit ve andezitik aglomeraların) görünümü

İnceleme sahasından alınan numunelerin kimyasal bileşimlerini ortaya koymak amacıyla Tüm Kayaç Analizleri (WRA) SGS Jeokimya Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ana oksitler İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektrometresi (ICP-AES), iz elementlerden As, B, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo Sb, Th ve W İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ve Ag ile Zn ise Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (AAS) yöntemleri ile analiz edilmiştir. Ateşte kayıp (A.K.) miktarını belirlemek için öncelikle örneğin nemi uzaklaştırılmıştır. Bunun için önceden belirlenen miktarda örnek alınarak 105°C'de 24 saat süreyle fırında kurutulmuş ve tartılarak ağırlığı belirlenmiştir. Karbondioksit ve sülfür gazı ölçümleri için %2'lik karbon (C) ve %1'lik sülfür (S) standartları hazırlanmış ve analize hazır hale getirilmiştir. Örnekler daha sonra yaklaşık 1 saat süreyle 1000°C'lik sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Isıtmadan önce ve sonraki ağırlıklar kontrol edilerek su, karbondioksit ve sülfür kayıpları belirlenmiş ve iki tartı arasındaki farkın yüzdesi alınarak örneklerin ateşte kayıp miktarları tespit edilmiştir.

Örneklerde kısa süreli sızıntı oluşturma davranışlarını izleyebilmek amacıyla Gümüşhane Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında Temas Sızıntı Testleri (Contact Leachate Test) gerçekleştirilmiştir. Cevherli ve yan kayaçlardan alınan numuneler modifiye USEPA (United States Environmental Protection Agency) 1312 standardına göre 24 saat süreyle 3:1 sıvı/katı oranlı saf su (deiyonize) temas sızıntı testine tabi tutulmuş ve alınan değerler su kalite standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar AMD potansiyelinin belirlenmesi için uygulanan diğer testler ile birleştirilerek asit üretme potansiyellerinin ve kapasitelerinin, nötürleştirme potansiyellerinin ve metal salınımlarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. AMD potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer test grubu ise Asit Baz Muhasebesi (ABA) testleri olup, ilgili analizler Düzen Norwest Çevre Gıda ve Veteriner Sağlık Hizmetleri Eğitim

Danışmanlık Ticaret A.Ş. Laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Bu analiz metodu ile örneklerin pH, Nötralizasyon Potansiyel Oranı (NPO) Asit Potansiyeli (AP), Nötralizasyon Potansiyeli (NP), Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP) ve Sülfid (S^{-2}) değerleri elde edilmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Statik Testler

4.1.1. Tüm Kayaç Bileşimlerinin Değerlendirilmesi

Elde edilen ana (%) ve iz (mg/kg) element analiz sonuçlarının Ortalama Yer Kabuğu Oranları (OYKO; Smith ve Huyck 1999) ile karşılaştırmalı değerlendirilmesi sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

İnceleme alanında yan kayaç ve cevherli atıklardan alınan tüm örneklerin SiO_2 içeriklerinin dağılımı OYKO'nun altındadır. SiO_2 yüzdeleri yan kayaçlarda %46.10-53.10 arasında değişirken, cevherli örneklerde ise bu oran 7.94-10.40 arasındadır. Tüm örneklerde ortalama SiO_2 içerikleri yan kayaç ve cevherli kayaçlarda sırasıyla %49.12 ve %9.26 olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Yan kayaçların Al_2O_3 içerikleri %17.60-21.10, Fe_2O_3 içerikleri ise %8.01-11.00 arasında değişmektedir. Cevher içeren kayaçlarda ise bu oranlar sırasıyla %1.20-1.72 ve %6.70-14.2 aralığındadır. Yan kayaçlarda ortalama Al_2O_3 ve Fe_2O_3 değerleri sırasıyla %19.13 ve %9.38, cevherli örneklerde ise %1.50 ve %11.00 olarak hesaplanmıştır. Her bir litolojiye ait ortalama MgO ve CaO oranları gerek yan kayaçlarda ve gerekse cevher içeren numunelerde OYKO'nun üzerinde kalmaktadır. Buna karşılık, Na_2O ve K_2O değerleri ise hem yan kayaçlarda hem de cevher içeren örneklerde OYKO'nun altında dağılım sergilemektedir. Yan kayaçlardan alınan örneklerde; ortalama TiO_2 (%0.84) içeriklerinin OYKO'a yakın olduğu, P_2O_5 (%0.17) oranlarının OYKO'nun altında kaldığı ve MnO (%0.22) içeriğinin ise OYKO'nun üzerinde olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, cevher içeren örneklerde ise; ortalama TiO_2 (%0.06) ile P_2O_5 (%0.03) içeriklerinin OYKO'nun altında kaldığı, ortalama MnO (%7.10) oranının ise OYKO'nun oldukça üzerinde dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. İnceleme alanından alınan tüm örneklerin Cr_2O_3 içerikleri ölçüm sınırının (%0.01) altında kaldığından ölçülememiştir. Yine, tüm örneklerin ateşte kayıp (A.K.) oranları kıyaslandığında yan kayaçların nispeten düşük (%1.19-6.92 ort: % 4.11), cevherli örneklerin ise içerdikleri sulu fazlar nedeniyle oldukça yüksek (%16.10-30.20 ort: %22.30) değerlerde çıktığı görülmektedir.

Tablo 1: Yan kayaç ve cevherli örneklere ait ana oksit analiz sonuçları (%)

Ana Elementler	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cr_2O_3	AK***	Toplam
*DL**	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
*OYKO***	57.76	15.12	7.15	3.48	4.12	3.24	3.13	0.83	0.23	0.12	0.03		
Numune No	**Andezit-Bazalt-Andezitik Aglomera**												
1	52.40	**21.10**	**8.48**	3.15	**8.95**	2.98	0.38	0.80	0.21	**0.18**	DLA	1.19	99.82
2	51.20	**20.90**	**8.01**	3.02	**8.82**	2.86	0.55	0.72	0.18	0.11	DLA	1.30	97.67
3	53.10	**19.40**	**8.32**	**3.81**	**9.88**	2.69	0.58	**0.92**	**0.29**	**0.20**	DLA	2.39	101.58
4	47.80	**18.20**	**9.81**	**6.41**	**8.59**	1.70	0.51	**0.87**	0.12	0.10	DLA	7.06	101.17
5	49.60	**18.60**	**9.43**	**6.11**	**8.69**	1.76	0.63	**0.89**	0.18	0.09	DLA	6.44	102.42
6	49.00	**18.70**	**9.10**	**5.76**	**9.06**	1.75	0.95	**0.89**	0.17	0.10	DLA	6.92	102.40
7	46.10	**17.60**	**9.12**	**5.87**	**8.85**	1.93	0.35	**0.84**	0.11	0.11	DLA	4.52	95.40
8	49.40	**19.10**	**11.00**	**4.66**	**8.81**	3.03	0.66	**0.84**	0.12	**0.18**	DLA	3.27	101.07
9	48.50	**18.50**	**9.33**	**6.07**	**9.26**	1.96	0.36	**0.87**	0.12	0.11	DLA	4.87	99.95
10	50.30	**18.70**	**11.00**	**4.54**	**8.20**	2.76	0.80	0.82	0.13	**0.18**	DLA	3.19	100.62
Minimum	*46.10*	*17.60*	*8.01*	*3.02*	*8.20*	*1.70*	*0.35*	*0.72*	*0.11*	*0.09*		*1.19*	
Maksimum	*53.10*	*21.10*	*11.00*	*6.41*	*9.88*	*3.03*	*0.95*	*0.92*	*0.29*	*0.20*		*7.06*	
Ortalama	*49.72*	*19.13*	*9.38*	*4.90*	*8.93*	*2.35*	*0.59*	*0.84*	*0.17*	*0.14*		*4.12*	
Numune No	**Cevher içeren kayaç**												
G1	10.40	1.69	**13.80**	**12.60**	**16.50**	0.38	0.28	0.06	0.04	**9.28**	DLA	16.80	81.83
G2	10.20	1.65	**13.80**	**11.80**	**15.00**	0.30	0.24	0.06	0.04	**8.90**	DLA	16.80	78.79
G3	9.82	1.55	**13.30**	**11.90**	**15.90**	0.35	0.25	0.06	0.04	**8.63**	DLA	16.10	77.90
G4	9.51	1.67	**13.40**	**11.60**	**15.00**	0.29	0.28	0.06	0.05	**8.61**	DLA	16.30	76.77
G5	10.30	1.72	**14.20**	**12.70**	**16.40**	0.35	0.28	0.06	0.04	**9.12**	DLA	16.10	81.27
A1	7.94	1.41	6.70	**15.90**	**20.90**	0.36	0.28	0.06	0.02	**7.82**	DLA	30.20	91.59
A2	8.38	1.31	**8.28**	**17.50**	**23.10**	0.40	0.25	0.05	0.02	**4.35**	DLA	29.00	92.64
A3	9.73	1.42	**9.24**	**16.80**	**22.10**	0.33	0.30	0.05	0.02	**5.17**	DLA	27.70	92.86
A4	7.95	1.20	**7.81**	**14.10**	**18.80**	0.28	0.24	0.05	0.02	**4.09**	DLA	27.60	82.14
A5	8.41	1.38	**9.46**	**16.50**	**21.50**	0.25	0.28	0.05	0.02	**5.07**	DLA	26.40	89.32
Minimum	*7.94*	*1.20*	*6.70*	*11.60*	*15.00*	*0.25*	*0.24*	*0.05*	*0.02*	*4.09*		*16.10*	
Maksimum	*10.40*	*1.72*	*14.20*	*17.50*	*23.10*	*0.40*	*0.30*	*0.06*	*0.05*	*9.28*		*30.20*	
Ortalama	*9.26*	*1.50*	*11.00*	*14.14*	*18.52*	*0.33*	*0.27*	*0.06*	*0.03*	*7.10*		*22.30*	

*DL: Deteksiyon Limiti; **OYKO: Ortalama Yer Kabuğu Oranı (Smith ve Huyck 1999); ***AK: Ateşte Kayıp; DLA: Deteksiyon Limiti Altında; OYKO bileşimlerinin üzerinde çıkan ana oksitler koyu punto ile gösterilmiştir.

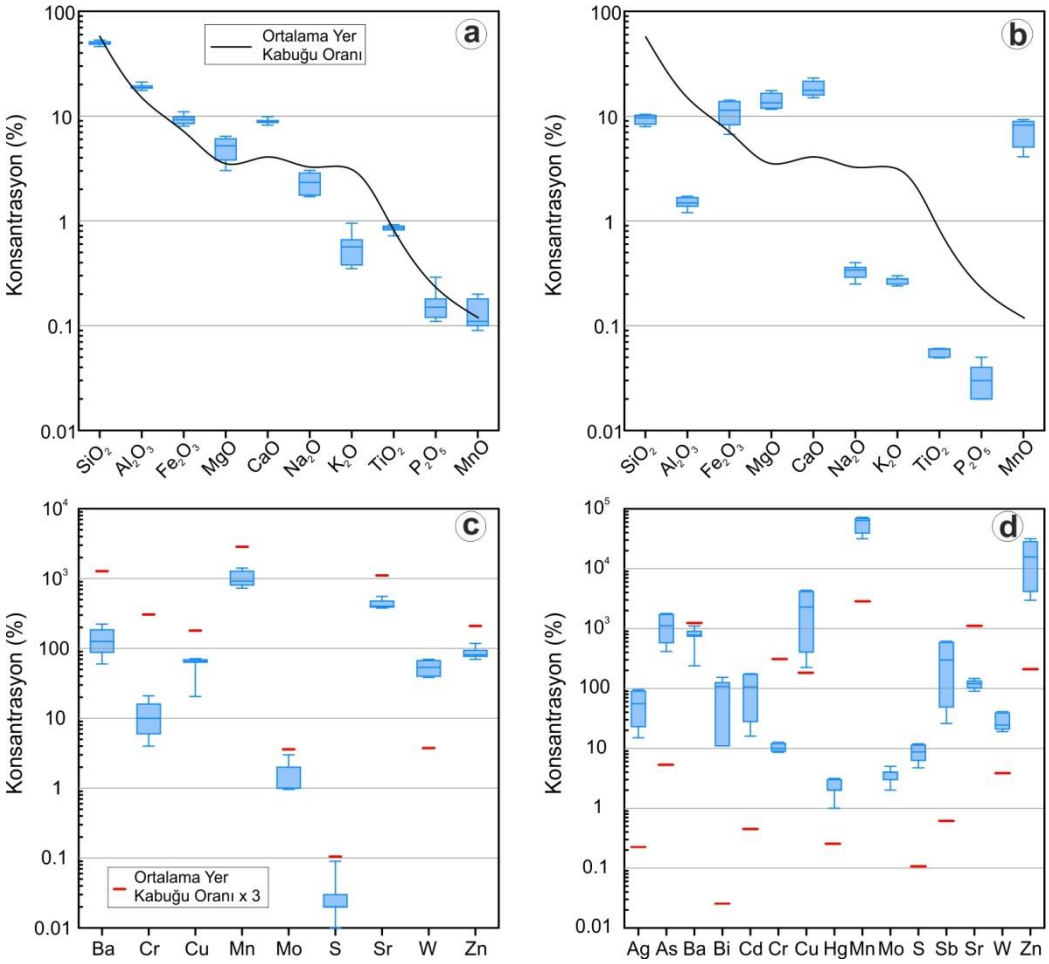
Çalışma alanında, özellikle cevher içeren kayaçların iz element kompozisyonlarında önemli değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 2). Hg ve W elementlerinin stok sahasından alınan cevherli örneklerde zenginleştiği, buna karşılık atık havuzundan alınan örneklerde ise ölçüm sınırının altında kaldığı görülmektedir. Diğer elementlerin büyük bir çoğunluğunun bileşiminde ise genellikle artış olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, Ba (239-1101 mg/kg), Cr (9-12 mg/kg) ve Sr (90-147 mg/kg) elementlerine ait konsantrasyon değerleri ise OYKO'nun 3 katı değerleri ile karşılaştırılmış ve söz konusu elementlerin konsantrasyonlarının bu değerlerin altında olduğu ortaya konmuştur. Diğer elementlerden Ag (15-95 mg/kg), As (414-1783 mg/kg), Bi (11-153 mg/kg), Cd (16-176 mg/kg), Cu (224-4353 mg/kg), Mn (31652-71582 mg/kg), Mo (2-5 mg/kg), S (4.72-11.6 %), Sb (26-616 mg/kg) ve Zn (2970-31629 mg/kg) değerlerinin ise gerek stok sahasından gerekse atık havuzundan alınan cevherli örneklerde, OYKO'nun 3 katı ile karşılaştırıldığında, genellikle zenginleştiği, bazı örneklerde ise bu değerlerin oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yan kayaçlardan alınan örneklerde ise Ag, As, Bi, Cd, Hg, Sb, Th ve W elementlerine ait konsantrasyon değerlerinin analiz ölçüm sınırının altında kaldığı tespit edilmiştir. Ba (60-223 mg/kg), Cr (4-21 mg/kg), Cu (20.5-71.3 mg/kg), Mn (728-1414 mg/kg), Mo (1-3 mg/kg), S (0.01-0.09 %), Sr (379-556 mg/kg), Y (11-14 mg/kg), Zn (70-118 mg/kg) ve Zr (53-80 mg/kg) elementlerine ait konsantrasyon değerlerinin ise OYKO'nun oldukça altında kaldığı görülmektedir.

Analiz edilen her bir parametre için maksimum, minimum ve ortalama değerlerin grafik üzerinde gösterimi yan kayaçlarda ana oksitler ve iz elementler için sırasıyla Şekil 5a ve Şekil 5b'de; cevher içeren kayaçlarda ve cevherli atıklarda ise sırasıyla Şekil 5c ve Şekil 5e'de sunulmuştur. Ölçüm sınırının altında kalan elementlere ait maksimum, minimum ve ortalama değerler ilgili şekillerde gösterilmemiştir. Buna ek olarak ana ve iz element konsantrasyonları topluca değerlendirildiğinde, OYKO'nun 3 katından fazla bileşime sahip elementler su kirliliği oluşturma potansiyeline sahip elementler olarak sınıflandırılmıştır. Bu elementlerin çevresel açısından risk yaratma durumunun değerlendirilmesi amacıyla, sızıntı oluşturma potansiyelleri temas sızıntı testi analizi ile değerlendirilmiştir.

Tablo 2: Yan kayaç ve cevherli örneklere ait iz element analiz sonuçları (mg/kg)

İz Element	**Ag**	**As**	**Ba**	**Bi**	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Mn**	**Mo**	**S**	**Sb**	**Sr**	**W**	**Zn**
*DL**	5	3	10	5	1	1	0.5	1	20	1	0.01	5	20	10	10
*OYKO***	0.075	1.8	425	0.0085	0.15	102	60	0.085	950	1.2	0.035	0.2	370	1.25	70
OYKO x3	0.225	5.4	1275	0.0255	0.45	306	180	0.255	2850	3.6	0.105	0.6	1110	3.75	210
Numune No							**Andezit-Bazalt-Andezitik aglomera**								
1	DLA	DLA	154	DLA	DLA	9	71.3	DLA	1389	2	0.01	DLA	556	**40**	94
2	DLA	DLA	142	DLA	DLA	5	69.4	DLA	956	1	0.02	DLA	504	DLA	70
3	DLA	DLA	185	DLA	DLA	17	63.5	DLA	1414	3	0.01	DLA	477	**67**	118
4	DLA	DLA	60	DLA	DLA	21	69	DLA	808	1	0.02	DLA	405	DLA	97
5	DLA	DLA	67	DLA	DLA	16	65.6	DLA	728	DLA	0.02	DLA	415	DLA	80
6	DLA	DLA	88	DLA	DLA	9	64.8	DLA	754	DLA	0.02	DLA	398	DLA	71
7	DLA	DLA	94	DLA	DLA	11	68.1	DLA	889	DLA	0.03	DLA	391	DLA	77
8	DLA	DLA	223	DLA	DLA	6	26.5	DLA	1072	1	0.09	DLA	379	DLA	84
9	DLA	DLA	110	DLA	DLA	11	64.1	DLA	841	DLA	0.03	DLA	395	DLA	77
10	DLA	DLA	187	DLA	DLA	4	20.5	DLA	1276	DLA	0.08	DLA	385	DLA	82
Minimum			*60*			*4*	*20.5*		*728*	*1*	*0.01*		*379*	*40*	*70*
Maksimum			*223*			*21*	*71.3*		*1414*	*3*	*0.09*		*556*	*67*	*118*
Ortalama			*131.0*			*10.9*	*58.3*		*1012.7*	*1.6*	*0.03*		*430.5*	*53.5*	*85.0*
Numune No							**Cevher içeren kayaç**								
G1	**92**	**1605**	791	**125**	**176**	9	**3934**	**2**	**71852**	**4**	**11.4**	**616**	133	**25**	**24142**
G2	**87**	**1780**	750	**116**	**175**	10	**4113**	**1**	**68939**	**4**	**11.3**	**587**	125	**24**	**28303**
G3	**95**	**1718**	656	**153**	**169**	9	**4175**	**3**	**66871**	**3**	**10.4**	**529**	124	**21**	**30201**
G4	**90**	**1783**	758	**106**	**172**	9	**4144**	**2**	**66722**	**5**	**11.1**	**612**	147	**19**	**31629**
G5	**88**	**1712**	825	**109**	**171**	11	**4353**	DLA	**70615**	**4**	**11.6**	**546**	136	**39**	**24165**
A1	**15**	**414**	239	DLA	**20**	10	**224**	DLA	**60609**	2	**4.72**	**26**	90	DLA	**3944**
A2	**19**	**579**	746	**11**	**16**	12	**647**	DLA	**33661**	3	**5.82**	**68**	102	DLA	**2970**
A3	**23**	**571**	1101	**11**	**31**	9	**443**	DLA	**40060**	**4**	**6.29**	**51**	117	DLA	**5758**
A4	**23**	**580**	899	DLA	**28**	12	**281**	DLA	**31652**	**4**	**6.53**	**37**	98	DLA	**4168**
A5	**24**	**623**	902	**11**	**42**	12	**405**	DLA	**39240**	**4**	**6.98**	**49**	109	**40**	**7211**
Minimum	*15*	*414*	*239*	*11*	*16*	*9*	*224*	*1*	*31652*	*2*	*4.72*	*26*	*90*	*19*	*2970*
Maksimum	*95*	*1783*	*1101*	*153*	*176*	*12*	*4353*	*3*	*71852*	*5*	*11.6*	*616*	*147*	*40*	*31629*
Ortalama	*55.6*	*1136.5*	*767*	*80.25*	*100*	*10.3*	*2271.9*	*2*	*55022*	*3.7*	*8.614*	*312.1*	*118*	*28*	*16249*

*DL: Deteksiyon Limiti; **OYKO: Ortalama Yer Kabuğu Oranı (Smith ve Huyck 1999); DLA: Deteksiyon Limiti Altında, OYKO bileşimlerinin 3 katı ve üzeri çıkan metaller tablolarda koyu punto ile gösterilmiştir.



Şekil 5: Stok sahası ve atık depolama alanlarından alınan örneklere ait a) Yan kayaçların ana oksit değerlerinin b) Cevher içeren kayaçların ana oksit değerlerinin c) Yan kayaçların iz element değerlerinin ve d) Cevher içeren kayaçların iz element içeriklerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri ile OYKO (siyah çizgi) ve OYKOx3 (kırmızı çizgiler)'e göre değişimleri.

4.1.2. Temas Sızıntı Testleri

Maden işletme ve depolama alanlarında olası sızıntı karakteristikleri ile ilgili değerlendirmeler yapmak amacıyla temas sızıntı testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı zamanda Yerüstü Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği (RG28483 2012)'nin su kalite standartları ile de karşılaştırılmıştır. Temas sızıntı testleri, su kirliliği oluşturma potansiyeline sahip elementler olarak belirlenen metallerin su ile sızıntıya geçme durumlarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Gerek yan kayaçların ve gerekse cevher içeren kayaçlar ile cevherli atık örneklerinin temas sızıntı testleri sonucunda pH değerlerinin sırasıyla 7.38-8.08, 7.50-7.97 ve 7.02-7.60 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu oranlar Yerüstü Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği Kıtaiçi Su Kaynak Sınıfları (RG28483 2012) ile karşılaştırıldığında tüm örneklerin pH değerlerinin I. sınıf seviyede olduğu tespit edilmiştir. Yan kayaç örneklerinde yapılan temas sızıntı testine göre Al, Fe ve Mn elementlerin kıta içi su kaynaklarının sınıflandırılmasına göre önemsiz miktarda I. sınıf değerlerinin üzerinde çıkmıştır. Bu durum yan kayaçların mineralojisi ile ilişkili olup, mafik ve kil minerallerinin varlığına işaret etmektedir.

Cevher içeren A numaralı atık örneklerinde A3 ve A5 nolu örnek hariç diğer örneklerin Na element içerikleri kıta içi su kaynaklarının sınıflandırılmasına göre I. sınıf aralığında yer almaktadır. A3, A4 ve A5 nolu numunelerde ise Pb konsantrasyonu kıta içi su kaynaklarının sınıflandırılmasına göre önemsiz miktarda I. sınıf değerlerinin üzerinde çıkmıştır (Tablo 3). Buna karşılık diğer örneklerde Pb içeriğinin I. sınıf seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Zn konsantrasyonu ise A3 nolu örnekte sınır değerde, diğer örneklerde ise kıta içi su kaynaklarının sınıflandırılmasına göre I. sınıf sevilerinde yer aldığı görülmektedir.

Cevher içeren G numaralı örneklerde Mn elementi hariç diğer elementlerin I. sınıf kıta içi su kaynak alanı sınırları içerisinde kaldığı, Mn değerlerinin ise gerek cevherli kayaçlarda gerekse cevher içeren atık örneklerinde kıta içi su kaynaklarının sınıflandırılmasına göre I. sınıf kıta içi kaynak suyunun sınır değerine çok yakın olmakla beraber önemsiz miktarda sınır değerin üzerinde yer aldığı belirlenmiştir.

Temas sızıntı testlerinden elde edilen analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde tüm elementlerin mobilitelerinin düşük olduğu, dolayısıyla yapılan madencilik faaliyetleri sonucunda çevresel bir sorun ile karşılaşılmayacağı söylenebilir.

Tablo 3: Maden işletme ve depolama alanlarının yan kayaç ve cevherli örneklerine ait temas sızıntı analizi sonuçları

Parametreler		**pH**	**Na**	**Al**	**Ba**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Ni**	**Pb**	**Zn**
Birimi		—	*mg/l*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*	*mg/1*
Kıtaiçi Su Kaynaklarının Sınıflandırılması	I	6.5-8.5	125	0.3	1	0.003	0.01	0.02	0.02	0.3	0.1	0.02	0.01	0.2
	II	6.5-8.6	125	0.3	2	0.005	0.02	0.05	0.05	1	0.5	0.05	0.02	0.5
	III	6.0-9.0	250	1	2	0.01	0.2	0.2	0.2	5	3	0.2	0.05	2
	IV	1.6/9-14	>250	>1	>2	>0.01	>0.2	>0.2	>0.2	>5	>3	>0.2	>0.05	>2
Yan Kayaç Örnekleri	1	8.08	19.18	**12.91**	0.53	<0.0003	0.0015	<0.0004	0.0033	**16.27**	0.0189	<0.0003	<0.0005	0.0024
	2	7.94	32.95	**30.98**	0.35	0.0007	0.0024	0.0013	0.0143	**39.48**	**0.1548**	<0.0003	0.0028	0.0113
	3	7.99	11.22	**2.12**	0.23	<0.0003	0.0022	<0.0004	0.0013	**2.39**	0.0056	<0.0003	<0.0005	0.0021
	4	7.86	1.75	**2.40**	0.12	<0.0003	0.0023	<0.0004	0.0010	**4.16**	0.0076	<0.0003	<0.0005	0.0031
	5	7.96	3.05	**1.41**	0.13	<0.0003	0.0021	<0.0004	<0.0003	**2.17**	0.0031	<0.0003	<0.0005	0.0026
	6	7.94	1.90	**1.69**	0.09	<0.0003	0.0019	<0.0004	<0.0003	**2.32**	0.0051	<0.0003	<0.0005	0.0028
	7	7.85	7.61	**5.16**	0.23	<0.0003	0.0031	<0.0004	0.0022	**8.85**	0.0258	<0.0003	0.0016	0.0060
	8	8.00	36.12	**4.37**	0.21	<0.0003	0.0022	<0.0004	0.0012	**4.71**	0.0130	<0.0003	<0.0005	<0.0005
	9	7.38	13.89	**5.92**	0.22	<0.0003	0.0021	<0.0004	0.0024	**8.75**	0.0170	<0.0003	<0.0005	<0.0005
	10	7.95	5.22	**3.04**	0.15	<0.0003	0.0019	<0.0004	0.0006	**4.50**	0.0120	<0.0003	<0.0005	0.0040
Cevherli Örnekler	A1	7.60	105.25	0.01	0.16	<0.0003	0.0017	<0.0004	0.0025	< 0.006	**0.1342**	<0.0003	0.0070	0.0886
	A2	7.02	98.77	0.01	0.19	<0.0003	0.0008	<0.0004	0.0021	0.02	**0.1454**	<0.0003	0.0090	0.1367
	A3	7.58	**172.82**	0.02	0.13	0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0037	0.04	**0.2432**	0.0008	**0.0184**	**0.2126**
	A4	7.59	75.59	0.01	0.15	0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0029	0.03	**0.1820**	<0.0003	**0.0123**	0.1342
	A5	7.35	**173.48**	0.01	0.14	0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0027	< 0.006	0.0808	<0.0003	**0.0127**	0.0632
	G1	7.89	38.25	0.06	0.06	<0.0003	<0.0004	<0.0004	<0.0003	< 0.006	**0.1475**	<0.0003	0.0180	0.0140
	G2	7.97	32.12	0.06	0.03	<0.0003	<0.0004	<0.0004	<0.0003	< 0.006	**0.1575**	<0.0003	0.0091	0.0094
	G3	7.86	36.27	0.06	0.03	<0.0003	<0.0004	<0.0004	0.0007	< 0.006	**0.1683**	<0.0003	0.0055	0.0153
	G4	7.50	54.04	0.06	0.01	<0.0003	<0.0004	<0.0004	<0.0003	< 0.006	**0.1745**	<0.0003	0.0068	0.0117
	G5	7.93	34.89	0.21	0.03	<0.0003	<0.0004	<0.0004	0.0010	0.26	**0.1915**	<0.0003	0.0486	0.0204

4.1.3. Asit-Baz Muhasebesi (ABM)

ABM, malzemelerin oksijen ve suya maruz kaldığı durumlarda AMD oluşturacak mineral aşınma potansiyellerini belirleyebilmek amacıyla kullanılan kompozisyonel analizlerden ve hesaplamalardan oluşan bir değerlendirme yöntemidir. Değerlendirmeler Tablo 4'de verilen ölçütler doğrultusunda yapılmakta olup, macun pH, sülfid (S^{-2}), AP, NP, NNP ve NPO parametreleri kullanılmaktadır. AP, analiz sonucu elde edilen S^{-2} miktarı kullanılarak, NP ise, nötürleştirme etkisi bulunan mineraller (karbonat ve silikat) göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Bu minerallerden karbonatlar, NP'ye etki eden en önemli mineral grubunu oluşturmaktadır. Özellikle Ca ve Mg içeren karbonatların büyük ölçüde NP'yi oluşturduğu söylenebilir. Dolayısıyla NP, açığa çıkacağı öngörülen asidin nötürleştirilebilmesi için gerekli olan kalsit (kalsiyum karbonat) miktarı olarak yorumlanmakta ve $kgCaCO_3$/ton birimi kullanılmaktadır. Karbonat-NP ise Toplam İnorganik Karbon (TIC) değeri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu değerler, test edilmiş birimin karbonat minerallerinden kaynaklanan nötürleştirme kapasitesini temsil etmektedir. Bununla birlikte, karbonat-NP hesaplamalarında; Siderit, Ankerit ve Rodokrozit gibi demir-mangan içeren karbonatların nötürleştirme kapasitesine etki etmediği düşünülür. Fakat her ne kadar bu mineraller çözündüklerinde başlangıçta kalsit gibi nötürleştirme etkisi gösterseler de, sonraki aşamalarda serbest kalan demir ve manganın oksitlenmesi ile ters etki yaratmaya başlarlar. ABM sonucunda belirlenen AP ve NP kullanılarak, NNP ve NPO hesaplanmaktadır. AMD potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bu iki yaygın parametreden birincisi (NNP); AP değerinin NP değerinden çıkartılması ile ikincisi ise (NPO); NP değerinin AP değerine bölünmesi ile elde edilmektedir. Bir diğer parametre olan macun pH değerleri ise malzemenin nötürleştirme kapasitesi hakkında ek bilgi vermekte olup, bu değerler numunenin saf su ile karışımı sonunda ölçülmektedir. Macun pH değeri kullanılarak asit üretiminde etkili olan mineraller ile nötürleştirme etkisi olan minerallerin kısa dönem denge durumu hakkında yorum yapılabilmektedir.

Tablo 4: Statik test değerlendirme parametreleri

Asit Baz Muhasebesi	Kriter	Tahmin
Macun pH	<6	Asit üretir
	<5	Asit üretir
Sülfid (% S^{-2})	<0.3	Potansiyel asit üreticisi değil
Kükürt (Toplam % S)	<0.05	Potansiyel asit üreticisi değil
Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP)	<-20	Potansiyel asit üreticisi
	>+20	Potansiyel asit üreticisi değil
	>-20, <+20	Belirsiz bölge
Nötralizasyon Potansiyel Oranı (NPO)	<1	Potansiyel asit üreticisi
	>2	Potansiyel asit üreticisi değil
	>1, <2	Belirsiz bölge
NNP= NP – AP ve NPO= NP/AP eşitliklerinden hesaplanmıştır		

Yapılan çalışma kapsamında, maden sahasında AMD oluşturma potansiyelinin olup olmadığının belirlenebilmesi için, seçilmiş olan numuneler üzerinde Asit-Baz Muhasebesi (ABM) testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

4.1.3.1. Macun pH Değerlendirmesi

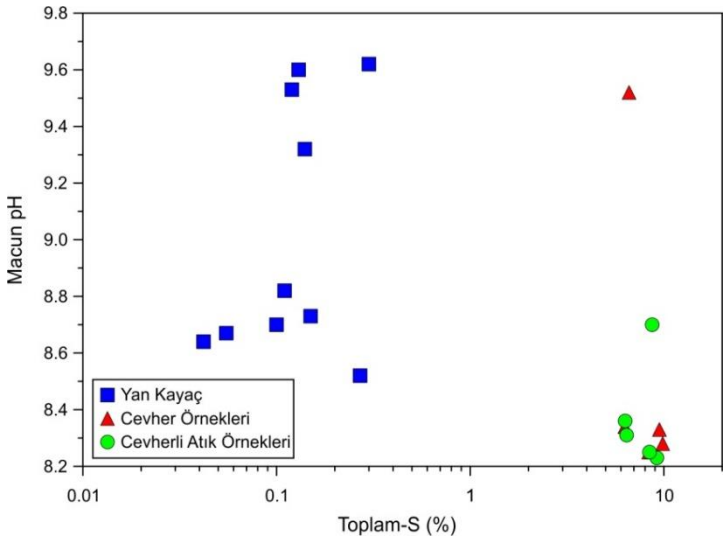
Çalıma alanından alınan örneklerde macun pH değeri ortalaması 8.74 olup, ölçülen en küçük değer 8.23 ve en yüksek değer ise 8.62 olarak belirlenmiştir. Bu değerler maden işletme sahasında AMD potansiyelinin bulunmadığına işaret etmektedir. Örneklerin S^{-2} değerlerinin <0.02 ve NNP (>20 kg$CaCO_3$/t) değerlerinin oldukça yüksek olması AMD potansiyeli olmadığını göstermektedir. Net Asit Üretimi pH (NAÜ pH) değerleri AMD potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer parametre olup, bu değerin 4.5'nin altında olduğu durumlarda örnekler potansiyel asit üretici olarak kabul edilmektedir. Çalışma kapsamında numunelerde gerçekleştirilen testlerde ise gerek yan kayaç gerekse cevherli örneklerde olsun, macun pH değerleri >4.5 olduğundan (Tablo 5), söz konusu maden işletme sahasından alınan numunelerin potansiyel asit üretici olmadığına işaret etmektedir.

Tablo 5: Yan kayaç ve cevherli örneklere ait Asit-Baz muhasebesi analiz sonuçları

Örnek No	Macun pH	%TIC	%S	%S^{-2}	%SO_4	AP	NP	NNP	NPO
1	8.52	98.10	0.270	<0.02	0.004	8.44	129.38	120.94	15.33
2	9.53	98.90	0.120	<0.02	0.002	3.75	85.94	82.19	22.92
3	8.82	98.40	0.110	<0.02	0.003	3.44	163.13	159.69	47.42
4	8.64	97.20	0.042	<0.02	0.003	1.31	204.69	203.38	156.25
5	8.67	97.20	0.055	<0.02	0.002	1.72	200.00	198.28	116.28
6	9.32	97.30	0.140	<0.02	0.004	4.38	170.31	165.93	38.88
7	9.60	98.10	0.130	<0.02	0.003	4.06	171.88	167.82	42.33
8	8.70	98.40	0.100	<0.02	0.002	3.13	150.00	146.88	47.92
9	8.73	98.30	0.150	<0.02	0.005	4.69	142.19	137.50	30.32
10	9.62	95.40	0.300	<0.02	0.009	9.38	120.94	111.56	12.89
G1	9.52	95.40	6.610	<0.02	0.273	206.56	787.81	581.25	3.81
G2	8.34	95.20	6.290	<0.02	0.247	196.56	775.31	578.75	3.94
G3	8.33	96.20	9.480	<0.02	0.315	296.25	773.13	476.88	2.61
G4	8.28	93.00	9.860	<0.02	0.318	308.13	785.63	477.50	2.55
G5	8.25	95.10	8.350	<0.02	0.296	260.94	817.19	556.25	3.13
A1	8.36	93.60	6.310	<0.02	0.418	197.19	862.50	665.31	4.37
A2	8.31	94.10	6.420	<0.02	0.486	200.63	825.00	624.37	4.11
A3	8.23	91.80	9.200	<0.02	0.489	287.50	782.50	495.00	2.72
A4	8.25	90.90	8.430	<0.02	0.537	263.44	811.56	548.12	3.08
A5	8.70	93.20	8.700	<0.02	0.782	271.88	813.75	541.88	2.99

4.1.3.2. Sülfid (S^{-2}) Değerlendirmesi

İnceleme alanından alınan örneklerde S^{-2} değerinin % 0.3'den küçük olduğu (Tablo 5) ve Tablo 4'de verilen değerlendirme parametrelerine göre gerek yan kayaçlarda gerekse cevherli örneklerde AMD potansiyelinin olmadığı söylenebilir. Bu iki parametrenin tüm numuneler için karşılaştırmalı dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.



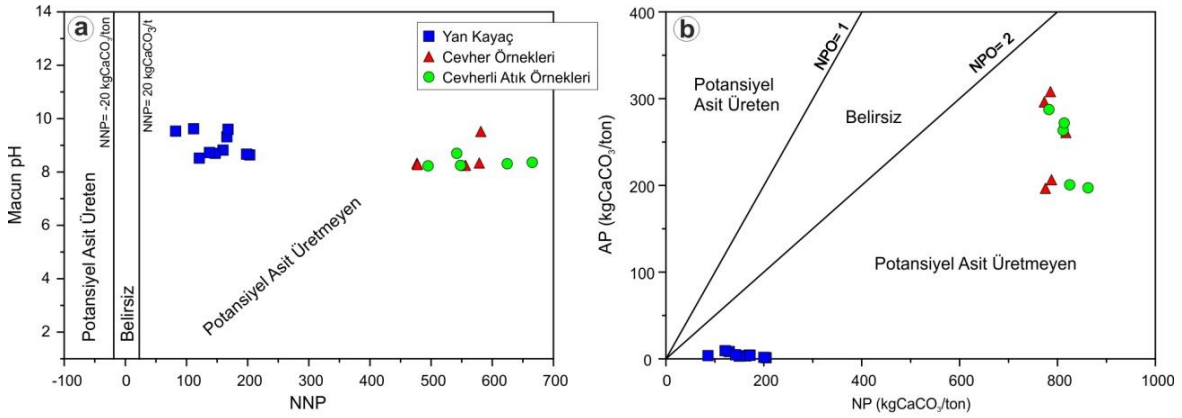
Şekil 6: Stok sahası ve atık depolama alanlarından alınan örneklere ait "Toplam-S (%)-Macun pH" karşılaştırma diyagramı

4.1.3.3. Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP) Değerlendirmesi

AMD değerlendirmelerinde kullanılan yöntemlerden birisi de NNP yöntemi olup, bu değer; NP'den AP'nin çıkarılması ile elde edilmektedir. NNP değerinin 20 kg$CaCO_3$/ton'dan büyük olması durumunda malzemelerin AMD potansiyelinin olmadığı, -20 ile 20 kg$CaCO_3$/ton arasında olması durumunda AMD potansiyel ile ilgili net bir fikir yürütülemeyeceği, -20 kg$CaCO_3$/ton'dan küçük olması durumunda ise AMD potansiyeli içerebileceği söylenebilir. Tablo 5'da verilen değerler incelendiğinde, numunelerin tamamının NNP değerinin 20 kg$CaCO_3$/ton'dan büyük olduğu görülmektedir. Bu durum sahadan alınan malzemelerin AMD potansiyelinin olmadığını işaret etmektedir. Tablo 5'da verilen NNP değeri ile sülfid sülfür değerleri karşılaştırıldığında ise tüm örneklerin potansiyel asit içermeyen oranlar sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, macun pH değerleri ile NNP değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 7a'da incelenen tüm numunelerin potansiyel asit üretmeyen alana düştüğü görülmektedir.

4.1.3.4. Nötralizasyon Potansiyel Oranı (NPO) Değerlendirmesi

NPO, AMD potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer önemli parametre olup, NPO < 1 ise "Potansiyel asit üreten"; NPO > 2 ise "Potansiyel asit üretmeyen" ve 1< NPO <2 ise "Belirsiz" olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu kriterler dikkate alındığında, NPO değerlerinin yan kayaçlarda 12.89-150.25, cevherli örneklerde 2.55-3.94 ve cevher içeren atık örneklerinde 2.72-4.37 arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 5). Dolayısıyla, NPO değerlerinin 2'den büyük olduğu ve maden işletme sahasından alınan numunelerin AMD potansiyeli içermediği tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 7b'de verilen ve NPO'nun hesaplanmasında kullanılan AP ve NP parametrelerinin karşılaştırıldığı grafik ile de desteklenmektedir. Nitekim söz konusu diyagramda tüm örnekler "potansiyel asit üretmeyen" alanda yer almaktadır.



Şekil 7: Stok sahası ve atık depolama alanlarından alınan örneklere ait a) NNP - Macun pH b) NP – AP değerlerinin karşılaştırılması

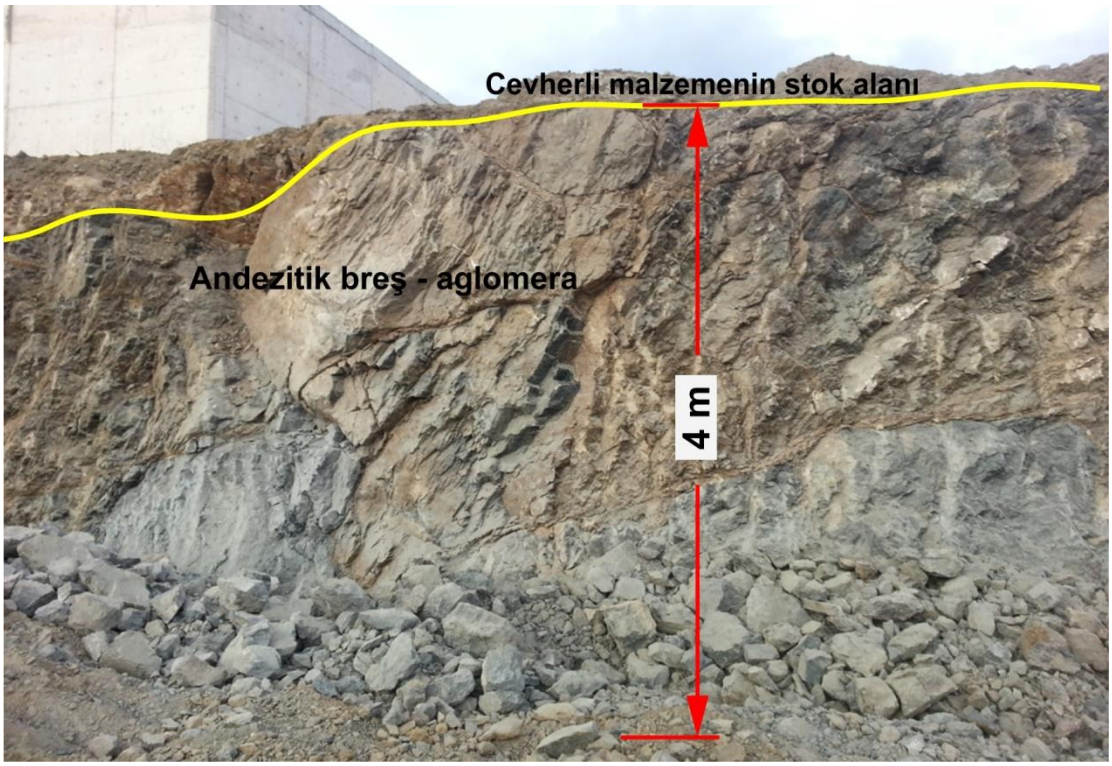
Temas sızıntı suyu, ABM sonuçları, sülfid sülfür oranları ve yapılan değerlendirmelere göre maden işletme sahasında AMD oluşum potansiyelinin oluşmayacağı düşünülmektedir. Maden işletme sahasında pasa malzemesi depolama alanı olmadığından, cevher stok sahasından alınan cevherli örnekler tesiste zenginleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra ortaya çıkan atık malzemeler direkt olarak sahada bulunan atık havuzuna gönderilmektedir. Atık havuzunda biriken malzeme üzerinde yapılan statik testler sonucunda bu atıkların AMD oluşturma potansiyelinin bulunmadığı ortaya konmuştur. Ancak, kısa vadede AMD potansiyeli oluşumu beklenmese dahi uzun sürelerde muhtemel oluşabilecek AMD oluşumunun önüne geçmek amacıyla atık havuzunun yapımında bazı parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda geçirimsizlik için yapılan jeoteknik uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda, atık barajında uzun sürede oluşması muhtemel AMD'nin yer altı suyuna ve doğaya sızması önlenmiş olmaktadır.

4.2. Cevher Stok Sahası Kaya Kütlesinin Geçirimlilik Değerlendirmesi

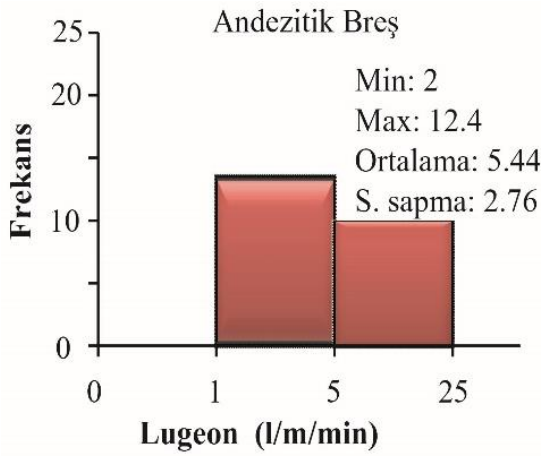
Kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde (geçirimlilik, taşıma kapasitesi ve duraylılık) gerçek koşullara en yakın çözümler üreten yöntemlerin başında gelen sonlu elemanlar yöntemi geçmişten günümüze birçok mühendislik tasarısında çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Gürocak 2011; Kaya vd. 2011; Alemdağ vd. 2008; Gürocak vd. 2008; Gürocak ve Alemdağ 2012; Alemdağ vd. 2014; 2015; Alemdağ 2015; Kanık vd. 2015; Alemdağ vd. 2017; Kaya vd. 2016; Kaya 2017; Kanık 2018). Özellikle son zamanlarda baraj eksen yeri enjeksiyon perde derinliğinin tespiti ve atık barajı rezervuar alanlarında oluşacak geçirimlilik zonlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kanık 2009; Gürocak ve Alemdağ 2012; Alemdağ 2015). Baraj eksen yeri ve rezervuara alanları için yapılan uygulamalarda, özellikle sulama, içme suyu sağlama ve enerji üretme amacıyla inşaa edilen barajlarda genellikle baraj eksen yerinde yapılmakta olup, geçirimsizlik temelde enjeksiyon perdesi oluşturulması ile sağlanmaktadır. Ancak atık barajı veya atık depolama sahalarında asit maden potansiyeli oluşturacak cevherli kütlelerin veya kimyasal risk içeren atıkların yağış suları ile etkileşiminde veya kimyasal atıkların depolandığı rezervuar alanında oluşacak herhangi bir sızma hiçbir şekilde yüzey veya yeraltı suyuna karışmaması gerekmektedir. Gümüştaş Madencilik işletme sahasının atık barajı ve stok alanlarının bulunduğu kaya kütlesi Alibaba Formasyonu'na ait andezitik breş ve aglomeralardan oluşmaktadır (Şekil 8). Andezitik breşlerin ortalama kalınlığı 12 m civarında olup, daha derin zonlarda andezitlere geçiş göstermektedir. Andezitik breş kaya kütlesinin geçirimlilik özelliğini belirlemek amacıyla, inceleme alanında açılmış olan araştırma sondajlarında basınçlı su testleri yapılmış ve kaya kütlelerinin Lugeon (Lugeon 1933) değerleri belirlenmiştir. Lugeon (LU) 10 atm gerçek basınç altında 1 dakikada, 1m uzunluğundaki deney zonunda litre olarak kaçan su miktarı olarak tanımlanmaktadır. Deney esnasında 10 atm basınca çıkılamadığı seviyelerdeki geçirimliliği hesaplamak içinse Nonveiller (1989) tarafından önerilen eşitlik (1) kullanılmıştır. Lugeon değerlerinin dağılımını gösteren Şekil 9'a göre, andezitik breşlerin az geçirimli özellik gösterdiği belirlenmiştir.

$$LU = \frac{Q*10}{P*L} \tag{1}$$

LU: Lugeon (l/dak/m)
Q: Kuyuya verilen su miktarı (l/dak)
P: Uygulanan basınç (kg/cm^2)
L: Kademe boyu (m)



Şekil 8: Stok sahası ve taban kayasını oluşturan andezitik breş ve aglomeraların görünümü



Şekil 9: Stok sahasındaki andezitik breş kaya kütlelerine ait Lugeon değerlerinin frekans dağılımı

4.2.1. Stok Sahasında Geçirimsizlik İçin Yapılan Çalışmalar

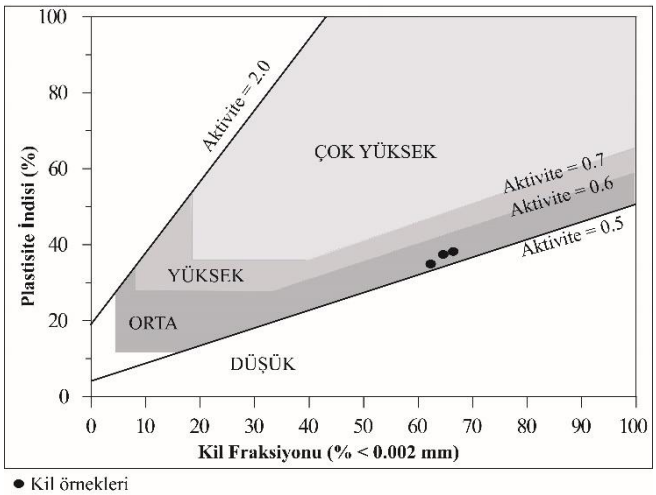
Stok alanında geçirimsizliği sağlamak amacıyla temel kaya kütlesi üzerine 50 cm sıkıştırılmış geçirimsiz kil malzemesi serilip, silindir ile sıkıştırılmış (Şekil 10), daha sonra mevcut kütle de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak *Phase*^{2} *6.0*. bilgisayar programında sızma analizi (Seepage Analizi) ile ortamın geçirimsizliği sayısal olarak modellenmiştir. Bu alana serilmiş olan kilin mühendislik özelliklerini belirlemek için üç adet örselenmiş numune alınmıştır. Bu numuneler Gümüşhane Üniversitesi Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarında ASTM D 422-63 (2003) ve ASTM D 4318-00 (2003) standartlarına uygun olarak elek analizi, hidrometre analizi, likit limit, plastik limit deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneylerine ait sonuçlar ise Tablo 6'de verilmiştir.

Şekil 9: Maden işletme sahası stok alanında yapılan kil serme ve sıkıştırma işlemleri

Tablo 6: Stok sahasına serilmiş olan kilin fiziksel özellikleri

Malzeme Özellikleri	Örnek No	En az	En Çok	Ortalama
Likit Limit	3	51	58	53
Plastik Limit	3	16	21	18
Plastisite İndeksi	3	35	37	35
Kil (%)	3	60	66	62
Zemin sınıfı	3	**CH** (Yüksek plastisiteli kil)		

Tablo 6'deki ortalama değerlere göre zemin "yüksek plastisiteli kil" sınıfına girmektedir. Teoride yüksek plastisiteli killer yüksek şişme potansiyeline sahip olmalarına karşın (Van der Merwe 1964), killerin şişme potansiyeli aktivite katsayıları belirlenerek yorumlanmalıdır. Bu nedenle Van der Merwe (1964) tarafından önerilen aktivite abağı kullanılarak killerin şişme potansiyeli değerlendirilmiş olup (Şekil 10), killerin orta-düşük derecede şişme potansiyeli sınırında olduğu belirlenmiştir.



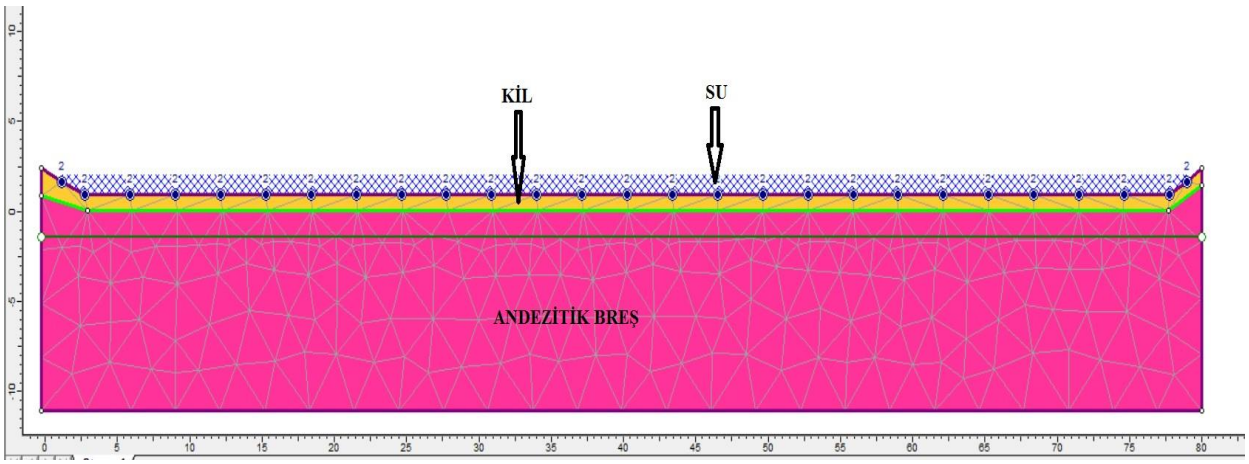
Şekil 10: Stok sahasında kullanılan kilin aktivite abağındaki dağılımı

Killerin sıkıştırılmış haldeki geçirimlilik katsayısını belirlemek amacıyla iki adet örselenmiş örnek üzerinde düşen seviyeli geçirimlilik (Falling Head Permeability) deneyi yapılmıştır. Deneyler optimum su içeriğinde ve standart proktor enerjisinde sıkıştırılmıştır kil örnekleri üzerinde ASTM D 5856 (2007) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kilin sıkıştırılmış haldeki ortalama geçirimlilik katsayısı değeri 1.21×10^{-9} m/sn olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, geçirimlilik deneylerine ait sonuçlara göre optimum su içeriğinde sıkıştırılan kil geçirimsiz özelliktedir.

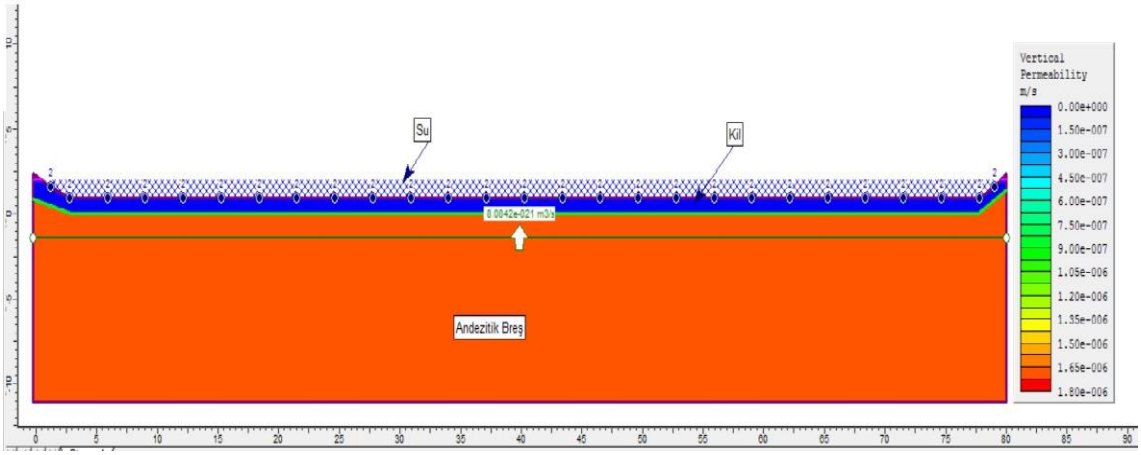
Buna ek olarak, stok sahası taban kayasını oluşturan andezitik breşlerin, yapılacak iyileştirmeler ile geçirimsiz hale getirilmesi gerekmektedir. Bu konudaki yapılan en yaygın uygulama tipi geçirimli alana kil serilmesi ve sıkıştırılması yöntemidir. Geçirimsiz özellikte kil serilerek bir iyileştirme yönteminin uygulanması halinde, geçirimlilik problemlerinin ortadan kalkıp kalkmadığını kontrol etmek amacıyla sayısal analizler yapılmıştır. Söz konusu analizler Phase^2 6.0 (Rocscience 2007) programında sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiş olup, analizlerde Tablo 7'de verilen parametre özellikleri kullanılmıştır. Atık barajı eksen yeri ve rezervuar alanı için sayısal analiz hesaplamalarında statik su yükü ve 50 cm kalınlığındaki geçirimsiz özellikteki kil dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ağ modeline göre (Şekil 11), stok sahası tabanında gerçekleştirilen kil uygulamasından sonra geçirimlilik değerlerinin 1.5×10^{-7} m/s, 2m derinlikte elde edilen deşarj değeri 8.08×10^{-21} m^3/s (Şekil 12) olarak belirlenmiştir. Geçirimsizliği sağlamak amacıyla yapılan kil uygulaması sonucunda, stok alanı geçirimsiz hale getirilmiştir.

Tablo 7: Sayısal analizde kullanılan parametreler

Malzeme Özellikleri	Andezitik Breş	Malzeme Özellikleri	Kil
Birim Ağırlık (MN/m^3)	0.0254	Birim Ağırlık (MN/m^3)	0.0157
Elastisite Modülü (MPa)	2033	Elastisite Modülü (MPa)	4
Poisson Oranı	0.37	Poisson Oranı	0.4
Yenilme Kriteri	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	Yenilme Kriteri	Mohr-Coulomb
Malzeme Tipi	Plastik	Pik sürtünme açısı	27º
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	54.5	Pik kohezyon	0.033
m_b	0.534	Rezidüel sürtünme açısı	16º
s	0.0001	Rezidüel kohezyon	0.011
a	0.516	K_s	1.21e-009
Rezidüel m_b	0.267	K_2/K_1	1
Rezidüel s	5e-005		
Rezidüel a	0.258		
Hidrolik Model	Basit		
Ks (m/s)	1.69e-006		
K_2/K_1	1		



Şekil 11: Sayısal analizde kullanılacak sonlu eleman ağ modeli



Şekil 12. Stok alanında uygulanan sonlu elemanlar sızma analizi

5. Sonuçlar

Gümüştaş Madencilik'e ait atık barajı rezervuarı ve cevher stok alanlarında AMD oluşumunu belirlemeye yönelik değerlendirmeler yapılmış ve AMD gelişme potansiyeli ile muhtemel AMD gelişmesi durumunda alınacak tedbirlere yönelik çalışmalar ortaya konmuştur. Bu kapsamda, maden işletme sahasında AMD potansiyelinin belirlenmesi amacıyla cevher stok ve atık depolama alanları ile yan kayaçlardan örneklemeler yapılarak jeolojik - jeokimyasal karakterizasyonu ortaya çıkarılmıştır.

Madencilik faaliyetleri kapsamında işletilmekte olan cevherli alan Eosen yaşlı andezit ve bazalt ile bunların piroklastitlerinden oluşan Alibaba Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Yan kayaçların Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO ve TiO_2 konsantrasyonları genel olarak OYKO değerini üzerinde yer alırken, SiO_2, Na_2O, K_2O, P_2O_5 ve MnO içerikleri bu değerlerin altında dağılım sergilemektedir. Cevher içeren örneklerde ise benzer şekilde Fe_2O_3, MgO, CaO ve MnO elementlerinde OYKO'ya göre zenginleşme gözlenmekte, diğer bileşenler ise sınır değerin altında yer almaktadır. Yan kayaçların tamamının iz element bileşimleri ölçüm sınırı ve/veya OYKOx3 sınırının altında kalmaktadır. Buna karşın, cevher içeren örneklerde Ba, Cr ve Sr dışındaki diğer tüm elementlerde zenginleşme gözlenmektedir.

Temas sızıntı testi sonuçlarına göre pH değerleri, tüm örneklerin I. sınıf kıta içi kaynak suyu özelliğinde olduğunu göstermektedir. Bazı elementlerde (örneğin Al, Fe, Mn) litolojilerindeki mafik ve kil mineral içerikleri ile ilişkili olarak yüksek değerler de elde edilmiştir. Tüm elementlerin mobiliteleri düşük olup, bu durum AMD potansiyeli açısından maden işletme sahasında herhangi bir çevresel sorun teşkil etmemektedir. ABM çalışmaları neticesinde örneklerin macun pH ve S^{-2} değerleri maden işletme sahasında AMD potansiyelinin bulunmadığına işaret etmektedir. NNP değerlerinin tüm örneklerde 20 kg $CaCO_3$/ton'dan büyük olması da bu durumu desteklemektedir. Bununla birlikte NPO değerlerinin 2'den büyük olması da tüm örneklerin potansiyel asit üretmeyen karakterde olduğunu göstermektedir. Gerek ABM ve gerekse temas sızıntı suyu test sonuçları, sülfid sülfür miktarının da çok düşük olduğu göz önüne alındığında kısa dönem içerisinde asit kaya drenajı potansiyeli gerçekleşmeyeceğini işaret etmektedir.

Cevher stok sahası kaya kütlesinin geçirimliliğinin belirlenmesine yönelik Seepage Analizi ile geçirimlilik testleri yapılmış ve andezitik breşlerin az geçirimli özellikte olduğu belirlenmiştir. Stok alanına dökülecek cevherli malzeme üzerinde yapılan statik testler değerlendirildiğinde kısa sürede asit kaya drenajı oluşum potansiyeli beklenmemektedir. Ancak uzun sürede AMD oluşumunun gerçekleşme ihtimali söz konusu olabilir. Bu durumu önlemek ve stok sahasını geçirimsiz hale getirmek için stok sahasına 50cm kalınlığında geçirimsiz özellikte kil malzeme serilerek sıkıştırılmıştır. Bu işlem sonrası oluşan düşey profil, sonlu eleman ağ sisteminde modellenerek 2m derinlikteki su deşarjları değerlendirilmiş olup ($8.08x10^{-21}m^3/s$), değerin sıfıra çok yakın olması sebebi ile ortam geçirimsiz olarak değerlendirilmiştir. Yapılan kil sıkıştırma sonrasında stok sahası tamamen geçirimsiz hale getirilmiş olup, AMD'den kaynaklanacak yerüstü ve yeraltı suyu kirliliği önlenmiş olacaktır.

Yapılan tüm çalışmalar neticesinde maden işletme sahasında kısa sürede AMD oluşumu beklenmediği sonucuna varılmış, ancak alınacak önlemler ile maden işletme alanında, stok sahasında ve atık havuzunda uzun sürelerde oluşması muhtemel AMD oluşumundan kaynaklanacak yüzey ve yeraltı suyu kirliliği ve dolayısıyla çevre kirliği önlenmiş olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan, sahadan numunelerin alınmasına ve analiz edilmesine yardımcı olan Gümüştaş Madencilik Tic. A.Ş. (Gümüşhane)'ye, özellikle Erdal GÜLDOĞAN ve Uğur ÖLGEN'e katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akaryalı E., (2010), *Arzular (Gümüşhane KD-Türkiye) Altın Yatağının Jeolojik, Mineralojik, Jeokimyasal ve Kökensel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Akaryalı E., (2016), *Geochemical, fluid inclusion and isotopic (O, H and S) constraints on the origin of Pb–Zn ± Au vein-type mineralizations in the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey)*, Ore Geology Reviews, 74, 1-14.

Akaryalı E., Tüysüz N., (2013), *The genesis of the slab window-related Arzular lowsulfidation epithermal gold mineralization (Eastern Pontides, NE Turkey)*, Geoscience Frontiers, 4, 409-421.

Akaryali E., Akbulut K., (2016), *Constraints of C–O–S isotope compositions and the origin of the Ünlüpınar volcanic-hosted epithermal Pb–Zn±Au deposit, Gümüşhane, NE Turkey*, Journal of Asian Earth Sciences, 117, 119-134.

Akçil A., Koldaş S., (2006), *Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies*, Journal of Cleaner Production, 14(12-13), 1139-1145.

Alemdag S., (2015), *Assessment of bearing capacity and permeability of foundation rocks at the Gumustas waste dam site, (Turkey) using empirical and numerical analysis*, Arabian Journal of Geosciences, 8, 1099-1110.

Alemdag S., Akgun A., Kaya A., Gokceoglu C., (2014), *A large and rapid planar failure: causes, mechanism and consequences (Mordut, Gumushane, Turkey)*, Arabian Journal of Geosciences,7(3), 205-1221.

Alemdağ S., Cinoğlu A., Gacener E., (2017), *The importance of amount of settlement in determining the bearing capacity of soils*, Bulletin of The Mineral Research and Exploration, 154, 169-180.

Alemdag S., Gurocak Z., Solanki P., Zaman M., (2008), *Estimation of bearing capacity of basalts at Atasu dam site, Turkey*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 1, 79-85.

Alemdag S., Kaya A., Karadag M., Gurocak Z., Bulut F., (2015), *Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: an example of the Kalebaşı district (NE Turkey)*, Journal of African Earth Sciences, 106, 134–146.

Anıl M., (2014), *Parajenezlerinde Sülfürlü Mineraller İçeren Maden Yataklarında Oluşabilecek Asit Kaya (Maden) Drenajlarının Çevresel Etkileri*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 1-26.

Arslan M., Aliyazıcıoğlu İ., (2001), *Geochemical and Petrological Characteristics of the Kale (Gümüshane) volcanic rocks: Implications for the Eocene evolution of Eastern Pontide arc volcanism, Northeast Turkey*, International Geology Review, 43, 595-610.

Arslan M., Şen C., Aliyazıcıoğlu İ., Kaygusuz A., Aslan Z., (2000), *Comparative geology, mineralogy and petrology of Eocene (?) volcanics in Trabzon and Gümüşhane areas (NE, Turkey)*, Earth Science and Mining Conference, Journal of Conference Book 1, 39-53.

Arslan M., Tüysüz N., Korkmaz S., Kurt H., (1997), *Geochemistry and Petrogenesis of the Eastern Pontide Volcanic Rocks, Northeast Turkey*, Chemie der Erde Geochem., 57, 157-187.

Aslan Z., (2010), *U–Pb zircon SHRIMP age, geochemical and petrographical characteristics of tuffs within calc-alkaline Eocene volcanics around Gümüşhane (NE Turkey), Eastern Pontides,* Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen, 187/3, 329–346.

ASTM D 422-63, (2003), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, In:Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, Philadelphia, PA, pp. 93-99.

ASTM D 4318-00, (2003), Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In: Annual Book of ASTM Standards, American Society For Testing and Materials, West Conshohocken, PA, vol. 04.08, pp. 582–595

ASTM Standard D5856, (2007), Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM International. West Conshohocken, PA.

Balcı N., Thomas D.B., Wayne C.S., Mikael M., Kevin W.M., (2006), *Iron Isotope Fractionation During Microbially Stimulated Fe(II) Oxidation and Fe(III) Precipitation.* Geochimica et Cosmochimica Acta, 3, 622-629.

Balcı N., Wayne C.S., Bernhard M., Kevin W.M., (2012), *Oxygen and Sulphur Isotope Systematics of Sulfate Produced During Abiotic and Bacterial Oxidation of Sphalerite and Elemental Sulphur*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 77, 335-351.

BCAMDTF, (1989), *Draft Acid Rock Drainage Technical Guide - Volume 1*, Prepared by Steffen Robertson and Kirsten (SRK), British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Vancouver, BC.

Bostanci H.T., Alemdag S., Gurocak Z., Gokceoglu C., (2018), *Combination of discontinuity characteristics and GIS for regional assessment of natural rock slopes in a mountainous area (NE Turkey)*, CATENA, 165, 487-502.

Çiftçi H., Akçıl A., (2006), *Asidik Maden Drenajının (AMD) Giderilmesinde Uygulanan Biyolojik Yöntemler,* Madencilik, 45(1), 35-45.

Delibalta M.S., Uzal N., Lermi A., (2016), *Ilgın Linyit İşletmeleri Göletlerinde Asit Maden Drenajı ve Rehabilitasyonu*, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5, 1, 73-82.

Demir Y., (2005), *Istala ve Köstere (Zigana/Gümüşhane) Cu-Pb-Zn Madenleri ve Yan Kayaçlarının Mineralojisi ve Dokusal Özelliklerinin Karşılaştırılmalı İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Demir Y., Uysal İ., Sadıklar M.B., (2013), *Mineral Chemical Investigation on Sulfide Mineralization of the Istala Deposit, Gümüşhane, NE-Turkey*, Ore Geology Reviews, 53, 306-317.

Demir Y., Uysal İ., Sadiklar M.B., Sipahi F., (2008), *Mineralogy, Mineral Chemistry, and Fluid Inclusion Investigation of Köstere Hydrothermal Vein-Type Deposit (Gümüşhane, NE-Turkey)*, Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, 185, 2, 215-232.

EPA, (1994a), *Innovative Methods of Managing Environmental Releases at Mine Sites*, USEPA, Office of Solid Waste, Special Wastes Branch (Washington DC), April, OSW Doc. 530-R-94-012.

EPA, (1994b), *Acid Mine Drainage Prediction*, USEPA, Office of Solid Waste, Special Wastes Branch (Washington DC), December, EPA 530-R-94-036.

Eyuboğlu Y., Santosh M., Dudas O.F., Akaryalı E., Chung S.L., Akdağ K., Bektaş O., (2013), *The nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting: A synthesis from the Eastern Pontides, NE Turkey*, Geoscience Frontiers, 4, 353-375.

Gücer M.A., Aydınçakır E., Yücel C., Akaryalı, E., (2017), *Tersiyer Yaşlı Altınpınar Hornblendli Andezitlerinin (Torul-Gümüşhane) Petrografisi, Mineral Kimyası ve P-T Kristalleşme Koşulları,* Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(2), 236-267.

Gurocak Z., (2011), *Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapikaya dam site, Turkey*, Bull Eng Geol Environ, 70(1), 41–52

Gurocak Z., Alemdag S., (2012), *Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses,* Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71, 221-229.

Gurocak Z., Alemdag S., Bostanci H.T., Gokceoglu C., (2017), *Discontinuity controlled slope failure zoning for a granitoid complex: A fuzzy approach*, Rock Mechanics and Engineering, Volume 5: Surface and Underground Projects, CRC Press Taylor & Francis Group, eBook ISBN: 978-1-317-48188-1, ss.1–25.

Gurocak Z., Alemdag S., Zaman M., (2008), *Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya Dam site, Eastern Turkey,* Engineering Geology, 96(1-2), 17-27.

Güven İ.H., (1993), *Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 1/25.000 ölçekli jeolojisi ve komplikasyonu,* MTA (Ankara), (yayınlanmamış).

Kanık M., (2009), *Ayvalı (Olur-Erzurum) Baraj Yerindeki Andezitlerin Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Kanik M., Gurocak Z., Alemdag S., (2015), *A comparison of support systems obtained from the RMR89 and RMR14 by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey*, Journal of African Earth Sciences, 109, 224–238.

Kanik M., Gurocak Z., (2018), *Importance of numerical analyses for determining support systems in tunneling: A comparative study from the trabzon-gumushane tunnel, Turkey*, Journal of African Earth Sciences, 143, 253-265.

Karadeniz M., (2005), *Asit Maden (Kaya) Drenajında Aktif ve Pasif Çözüm Yöntemleri,* Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Bildiriler kitabı, ss.91-97.

Karadeniz M., (2008), *Asit maden drenajı ve çözümü*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Oda Yayın No: 146, 231.

Karadeniz M., (2011), *Balıkesir-Balya Kurşun Çinko Madeni Flotasyon Atıklarının Asit Maden Drenajı Oluşum Potansiyelinin Derinlikle Değişiminin Araştırılması,* Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Karakaş G., Brookland I., Boehrer B., (2003), *Physical Characterisitic of Acid Mining Lake,* Aquatic Science, 65, 297-307.

Karapınar N., Kalyoncu Ergüler G., (2012), *Asit/Nötralizasyon Potansiyelinin Belirlenmesi ve Asit Maden Drenajı (AMD) Kimyasının Tahmin Edilmesinde MTA Genel Müdürlüğü İmkanları*, 65.Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, ss.128-129.

Kaya A., (2017), *Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale residential area (Giresun, NE Turkey),* Bull Eng. Geol. Environ, 76, 875–889.

Kaya A., Alemdağ S., Dağ S., Gürocak Z., (2016), *Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey),* Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(1), 89-99.

Kaya A., Bulut F., Alemdağ S., Sayın A., (2011), *Analysis of Support Requirements for a Tunnel Portal in Weak Rock: A Case Study in Turkey*, Scientific Research and Essays, 6(31), 6566-6583.

Lermi A., (2003), *Midi (Karamustafa/Gümüşhane, KD Türkiye) Zn-Pb Yatağının Jeolojik, Mineralojik, Jeokimyasal ve Kökensel İncelemesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Lottermoser B.G., (2010), *Mine Wastes: Characterization, Treatment, and Environmental Impacts*, 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Lugeon M., (1933), *Barrages et Geologie*, vol. 1, Librairie de l'Université. F. Rouge & Cie, S.A., Lausanne, 138ss.

Maden N., Akaryalı E., (2015), *Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization eastern Pontides NE Türkiye*, Journal of Applied Geophysics, 122, 74-85.

Mills C., (1995), *An AMD/ARD Dedicated Blog Based on The Text of a Presentation Given Mills to British Columbia High School Science Teachers*. Seminar; Acid Rock Drainage at the Cordilleran Roundup, Hotel Vancouver, Vancouver, BC.

Nonveiller E., (1989), *Grouting, Theory and Practice*, Elsevier, Amsterdam, 250ss.

Özçelik G.A., (2007), *Prediction Techniques of Acid Mine Drainage: A Case Study of a New Poly- Metallic Mine Development in Erzincan-Iliç, Turkey*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

RG (Resmi Gazete) 28483 (değişik ibare: RG-15/4/2015-29327) (2012), *Yerüstü Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği*, Orman ve Su İşleri Bakanlığın, Ankara.

Rocscience, (2007), Phase2 6.0 finite element groundwater seepage, Geomech Software and Res. Rocsci, Toronto.

Sipahi F., (2011), *Formation of Skarns at Gümüşhane (Northeastern Turkey)*, Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, 188, 2, 169-190.

Sipahi F., Kaygusuz A., Saydam Eker Ç., Vural A., Akpınar İ., (2018), *Late Cretaceous arc igneous activity: the Eğrikar Monzogranite example*, International Geology Review, 60, 3, 382-400.

Smith K.S., Huyck H.L.O., (1999), *An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals*. In G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Eds.), The Environmental Chemistry of Mineral Deposits, Reviews in Economic Geology, 6A, 29-70.

Şahin K., Kaygusuz A., (2016), *Mescitli (Torul/Gümüşhane) ve Çevresindeki Eosen Yaşlı Volkanik Kayaçların Petrografik, Jeokimyasal ve Petrolojik Özellikleri*, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(2), 89-116.

Şanlıyüksel Yücel D., (2013), *Asidik Su Kaynaklarının Karakteristikleri, Oluşumunu Sağlayan Faktörler ve Hidrojeokimyasal Özellikleri (Çan-Bayramiç; Biga Yarımadası Örneği)*, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale.

Şanlıyüksel Yücel D., Baba A., (2013), *Türkiye'de Asit Maden Göllerine Çan (Çanakkale) Havzası'ndan Güncel Birkaç Örnek*, Mavi Gezegen, 18, 1-6.

Tüysüz N., (1995), *Lahanos (Espiye-Giresun) Masif Sülfit Yatağına Ait Cevher Mineralleri ve Dokularının Cevher Oluşumu Açısından İncelenmesi*, Geosound, 26, 79-92.

Tüysüz N., (2000), *Geology, Lithogeochemistry and Genesis of the Murgul Massive Sulfide Deposit, NE Turkey*, Chemie der Erde, 60, 231-250.

Tüysüz N., Özdoğan K., Er M., Yılmaz Z., Ağanoğlu A., (1994), *Pontid Adayayında Carlin Tipi Kaletaş (Gümüşhane) Altın Zuhuru*, Türkiye Jeoloji Bülteni, 37, 41-46.

Van der Merwe D.H., (1964), *The prediction of Heave from the Plasticity Index and the Clay Fraction*, Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 6, 103-107.

Yörükoğlu A., Karadeniz M., (2003), *Asit Maden Drenajı Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, Türkiye 18. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya, 125-131.