

Araştırma Makalesi / Research Article

Niğde Özyurt Epitermal Tipi Au-Ag Mineralizasyonu Yan Kayaçlarının Asit Üretme Potansiyelinin Ulusal Mevzuat Çerçevesinde Değerlendirilmesi

Assessment of the Acid Generation Potential of Wall Rocks Associated with Niğde Özyurt Epithermal Au-Ag Mineralization in Compliance with National Legislation

Cansın AĞAÇ¹ , Emin Ender ÇELEBİ^{2,*} , Mehmet Salim ÖNCEL^{2,3}

¹ Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş., Çevre Yönetim Birimi, 34852, İstanbul, Türkiye

² Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

³ Gebze Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Geliş (Received): 11/11/2024 / Düzeltme (Revised): 03/12/2024 / Kabul (Accepted): 24/12/2024

ÖZ

Sülfütlü minerallerin yıkanması metalik maden yataklarında asit üretimi ve metal kirliliği meydana getirebilecek ciddi çevresel problemlere yol açabilmektedir. Niğde ili, Çamardı ilçesi, epitermal Au-Ag yataklarında rezerv tespiti ve maden işleme fizibilitesi amacıyla maden arama faaliyetleri yürütülmüştür. Bu kapsamda, Özyurt-Üçkapılı köyleri civarında elde edilen litolojik ve jeokimyasal olarak tanımlanmış karotlardan yan kayaç numunelerinin seçilmesi, örneklenmesi ve Türkiye’de ulusal bir düzenleme olan Maden Atıkları Yönetmeliği çerçevesinde asit üretme potansiyellerinin belirlenmesi ve karakterize edilmesi hedefleri doğrultusunda çalışmalar yürütülmüştür. Farklı lokasyon ve derinlikleri temsil edecek şekilde karotlardan 84 adet numune alınmıştır. ASTM 1915-20 standardı kapsamında infrared spektroskopisi yöntemi ile toplam kükürt değeri %0,1 altında saptanan 83 numune ve %0,1 üstünde tespit edilen dolayısıyla Modifiye Sobek yöntemi uygulanan ve NP/AP değeri “3,0” mertebesinin üzerinde 8,11 olarak saptanan 1 numune (NOP-85) de “asit üretmeyen inert maden atığı” olarak tanımlanmıştır. Ek olarak numunelerin karbonat nötralizasyon potansiyelleri ile birlikte Sobek asit potansiyelleri değerlendirilmiş ve NOP-85 numunesi harici numunelerin asit tüketebilir zonda oldukları belirlenmiştir. Sahadaki sülfütlü minerallerin azlığı ve/veya yoksunluğu ve baskın litolojinin mermer olması sebebiyle kalsit ve aragonit gibi alkali minerallerin bolluğu kimyasal kantitatif asit üretim potansiyeli analiz verilerini desteklemektedir. Çok değişkenli istatistiksel analizlerden biri olan hiyerarşik kümeleme analizi yürütülerek numunelerin asit üretim potansiyellerinin beş farklı kümede benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asit-baz hesaplama, Asit potansiyeli, Au-Ag cevheri yan kayaçlar, Maden Atıkları Yönetmeliği, Statik testler.

ABSTRACT

The leaching of sulfide minerals can lead to serious environmental issues, including acid generation and metal contamination in metallic ore deposits. In Niğde province, Çamardı district, mineral exploration activities were conducted to assess reserves and evaluate the feasibility of mining operations for epithermal Au-Ag deposits. As part of this study, core samples, with lithological and geochemical investigations performed, were selected and

sampled from the vicinity of Özyurt-Üçkapılı villages. The aim was to determine and characterize the acid generation potential of wall rock samples within the framework of national regulations in Turkey, specifically the Mine Waste Management Directive. A total of 84 samples representing different locations and depths were collected from the cores. Based on ASTM 1915-20 standards, 83 samples were identified as having a total sulfur content below 0.1% via infrared spectroscopy. One sample (NOP-85), with total sulfur content above 0.1%, was subjected to the Modified Sobek method and found to have an NP/AP ratio of 8.11, well above the threshold of 3.0, classifying it as "non-acid generating inert mining waste." Furthermore, the carbonate neutralization potential and Sobek acid potential of the samples were evaluated, revealing that all samples, except NOP-85, were in the acid-consuming zone. The low abundance or absence of sulfide minerals in the field, along with the dominance of marble as the primary lithology and the abundance of alkaline minerals such as calcite and aragonite, corroborate the quantitative acid generation potential chemical analysis data. Additionally, hierarchical cluster analysis, a multivariate statistical method, was performed, indicating that the acid generation potential of the samples exhibited similarities across five distinct clusters.

Keywords: Acid-base accounting, Acid potential, Au-Ag ore wall rocks, Mining waste regulation, Static tests.

GİRİŞ

Metalik madencilik faaliyetleri, kontrollü ve düzenli yürütülmediği takdirde doğal ortamı kısa süre içerisinde etkileyebilecek ve bozabilecek niteliktedir. Özellikle hava, su ve toprak kalitesinin bozulmasıyla flora ve fauna ciddi boyutlarda etkilenebilmektedir (Ağaç, 2021; Balcı ve Demirel, 2018). Metalik maden yatakları yan kayaçlarında oldukça gezgin olarak bulunan sülfütlü ve ikincil sülfat minerallerinin, yıkanma süreçleri ile hidroliz ve oksidasyona uğraması; karbonatlı kayaçların yoksunluğu ya da azlığı ile birlikte asit kaya drenajı (AKD) olarak adlandırılan asidik drenajların oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu problem özellikle yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarına ve toprağa en önemli tehditlerden biridir (Akcil ve Koldas, 2006; Dold, 2017; Sanliyuksel Yucel ve Baba, 2016). Pirit (FeS_2), markazit (FeS_2), pirotit (FeS), kalkopirit (CuFeS_2), enarjit (Cu_3AsS_4) gibi metalik sülfütlü minerallerin ayrışması AKD'nin ana kaynaklarından (Çelebi ve Öncel, 2016; Çelebi ve Ribeiro, 2023).

Madencilik faaliyetleri başlamadan önce yürütülen arama, rezerv belirleme, cevher ve işletme modelleri oluşturulması süreçlerinden elde edilen veriler, faaliyetin yürütülmesi

sonucu oluşacak atıklar (pasa, zenginleştirme atıkları vb.) hakkında da bilgiler sunmaktadır. Söz konusu coğrafik (konum, derinlik vb.), litolojik, jeokimyasal ve mineralojik ham veriler atıkların çevresel risk potansiyelini ortaya koymakta yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, ekonomik değeri olmayan pasaların (dekapaj ve cevher yan kayaç) kantitatif olarak asit üretme potansiyellerinin en uygun kimyasal ve mineralojik analizlerle karakterize edilerek tahmin edilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, atıkların karakterizasyonunda kalitatif ve kantitatif mineralojik analizlerin yanı sıra jeokimyasal statik ve kinetik testler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla son yıllarda kısa (statik) ve uzun (kinetik) süreli olmak üzere çeşitli asit üretimi belirleme teknikleri geliştirilmiştir (Ağaç vd., 2021; Bruynesteyn ve Duncan, 1979; Çelebi vd., 2018; Finkelman ve Giffin, 1986; Kalyoncu Erguler vd., 2014; Lapakko, 1992; Lawrence vd., 1989; Lawrence ve Wang, 1997; Price, 2009; Sobek vd., 1978; White III vd., 1997). Statik testler, ilgili testler arasında olduğundan daha eksik veya daha fazla tahmini asit üretim potansiyeli sonuçları üretmesine rağmen basitliği, hızlılığı ve maliyet etkinliği nedeniyle hala sıklıkla tercih edilmektedir. Tahmin sapmasını en aza

indirmek için sonuçların en uygun statik test yöntemiyle üretilmesi ve mineralojik analizlerle desteklenmesi gerekmektedir (Çelebi ve Ribeiro, 2023). Statik testler ile asit-baz hesaplama (ABH) yöntemi kullanılarak asit üretim potansiyeli (AP) ve nötralizasyon (asit tüketim) potansiyeli (NP) olmak üzere iki temel parametre değerleri tahmin edilmektedir. AP tahmininde kükürt içeriği baz alınırken; NP tahmininde karbonatlı minerallerden kaynaklı asit tüketimi belirlenmektedir. Sobek yönteminde toplam kükürt (TS) ile AP belirlenirken (Sobek vd., 1978); Lawrence ve Wang (1997) tarafından geliştirilen Modifiye Sobek yönteminde ise okside olmamış kükürt olan toplam sülfid (TS^{2-}) kükürdü ile AP daha güvenilir şekilde (sapmalar minimize edilerek) tahmin edilebilmektedir. Toplam Sülfid (TS^{2-}) ve toplam sülfat (TSO_4^{2-}) kükürdü içerikleri, sırasıyla sülfidik ve sülfatik AP belirlemeleri için temel parametrelerdir. Her ikisinin belirlenmesinde en uygun yöntem, kükürt formlarının TS içeriğinden sıralı olarak çıkarılmasıdır (EPA-600/12-78-054). TS tespiti için kızılötesi spektroskopi (IS, Karbon/Kükürt analizörü) veya X-ışını Floresan (XRF) teknikleri önerilmektedir (Çelebi ve Öncel, 2016; Dold, 2017; Sanliyuksel Yucel, 2019). TS tespitinin ardından uygulanan sıralı liç işlemleri ve sonrasındaki yeniden TS tayini ile TSO_4^{2-} ve TS^{2-} içerikleri saptanmaktadır. Bu aşamada, sülfatlı oluşumların liç edilmesi ve tespiti için amonyum oksalat ya da hidroklorik asit; sülfidli mineraller için ise nitrik asit ajanları kullanımı önerilmektedir (Çelebi ve Ribeiro, 2023; Dold, 2017). Modifiye Sobek ABH yaklaşımı ile yürütülen NP testinde, normalitesi ve miktarı bilinen hidroklorik asit (HCl) çözeltisi ile mutlak sıcaklıkta daha az agresif bir liç işlemi yürütülmektedir (Çelebi ve Öncel, 2016; Lawrence ve Wang, 1997; Shu vd., 2001).

Bu yöntem hidrojeokimyasal olarak sülfidleri oldukça az etkilemekte ve karbonatlı kayaçların asit tüketme potansiyelini de ortaya çıkararak güvenilir sonuçlar vermektedir.

Madencilik işletme faaliyetleri öncesinde olası maden atıklarının karakteristiklerinin belirlenmesi hem koruma kullanma dengesi açısından hem de çevresel etkilerin kontrol altına alınabilmesi için gerekli tedbirleri planlama açısından önem arz etmektedir. Bu vaziyetteki maden yataklarında yürütülen sondajlar neticesinde elde edilen karotlardan örnekleme yapmak; kapalı sistemdeki doğal yapının jeokimyasal davranışlarını tahmin etme fırsatı vermesi açısından önemlidir. Bu kapsamda, maden işletmecileri için bağlayıcı olan Türkiye’de Çevre Mevzuatı kapsamında yer alan Maden Atıkları Yönetmeliği (MAY) ile maden atıkları ve ekonomik değeri olmayan atıkların (pasa) asit üretme karakteristiklerinin kantitatif olarak belirlenmesi ve çıkacak sonuçlara göre atık yönetim planı oluşturması gerekmektedir. Bu doğrultuda, planlanan Au-Ag madenciliği faaliyeti sonrası cevher yan kayaçlarından teşkil olacak ekonomik değeri olmayan atıkların (pasa) asit üretim potansiyellerinin MAY çerçevesinde en uygun mineralojik ve kimyasal analiz yöntemleri ile kantitatif olarak güvenilir şekilde tahmin edilmesi ve sonuçların MAY hükümlerine göre değerlendirilmesi bu çalışmada hedeflenmiştir. Söz konusu yönetmelikte kabul gören yöntemlerin güvenilirliği tartışmalı olsa da uygun matrisli materyallerde (pirit ağırlıklı sülfidli mineral varlığı; kalsit-aragonit ağırlıklı karbonatlı mineral varlığı; jarosit ve alunit gibi ikincil minerallerin yanı sıra siderit minerali azlığı/yoksunluğu) MAY oldukça güvenilir sonuçlar üretebilmektedir (Çelebi, 2022).

MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanı ve Jeolojisi

Çalışma sahası, Niğde ili, Çamardı ilçesi, Özyurt-Üçkapılı köyleri civarında maden arama faaliyetlerinin yürütüldüğü ancak işletme faaliyetlerinin henüz başlatılmadığı alandır. Niğde il merkezinin kuş uçuşu yaklaşık 13 km güneydoğusunda yer almaktadır. Çalışma alanı sınırına en yakın yerleşim birimleri; 1,8 km kuzeydoğuda Özyurt köyü ve 4,5 km güneydoğudaki Üçkapılı Köyü'dür. Çalışma sahasının konumu Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışma sahasında Orta Anadolu Kristal Kompleksi olarak bilinen Neojen öncesi temel kayaçlar yer almaktadır. Niğde ve Kırşehir masifleri olarak adlandırılan bu kayaçlar, orta-yüksek derecede metamorfik kayaçlardan oluşmaktadır. Bu kompleks, Üst Kretase-Paleosen dönemine ait granitoidler tarafından kesilmektedir. Bölgede gözlenen piroklastikler, riyolitik ve dasitik bileşime sahiptir (Korkanç vd., 2017). Sahada yer alan gümüşler formasyonu içerisinde gözlemlenen gnays ve amfibolit şistler bantlı mermerler ile kontaklar halinde yer almaktadır. Bu kontaklarda metamorfiklerin silis alterasyonuna uğradığı ve yer yer içerisinde 0,1-3,0 cm genişliğinde metamorfik kuvarslar barındırdığı gözlenebilmektedir. Sahanın Güney kesimlerinde Üçkapılı granitini ve bunları kesen aplitlerini görmek mümkündür. Sahanın Doğu kesimlerinde Eosen yaşlı volkanik birimler hakimdir. Tüm bu birimler yer yer güncel alüvyonlarla örtülüdür. Metamorfizmaya uğramış rekristalize kireç taşları içerisinde kuvars damarcıkları yer almaktadır. Mermer ve şist kontaklarında gözlemlenen ezik zonlarda pirit, arsenopirit mineralizasyonuna rastlamak mümkündür (SRK Danışmanlık, 2023).

Örnekleme bölgesinin de gösterildiği çalışma sahasının 1/10.000 ölçekli jeolojik haritası Şekil 2 içerisinde yer almaktadır.

Daha önce yürütülen saha çalışmasında, epitermal tipi Au-Ag cevherleşmesinin gözlemlendiği mostralara ve jeofizik araştırmalar ışığında karot, kırıntı ve numune alma şeklinde arama faaliyetleri gerçekleştirilmiştir (SRK Danışmanlık, 2023). Bu çalışmalardan elde edilen cevher yatağına ait jeokimyasal veriler ile oluşturulan 3 boyutlu cevher modeline göre 1.215.000 ton görünür, 4.184.000 ton muhtemel olmak üzere 5.399.000 ton rezerv varlığı belirlenmiştir. Açık ocak madencilik yöntemi ile yıllık 300.000 ton/yıl cevher üretimi yapılması planlanmaktadır. Bu cevher üretimine karşılık yaklaşık 600.000 m³/yıl pasa/yan kayaç açığa çıkacağı öngörülmektedir. Görünür rezerve göre madencilik faaliyetlerinin ömrü yaklaşık 4 yıl olarak belirlenmiş olup bu sürede toplam yaklaşık 2.400.000 m³ pasa/yan kayacın açığa çıkacağı öngörülmektedir (SRK Danışmanlık, 2023).

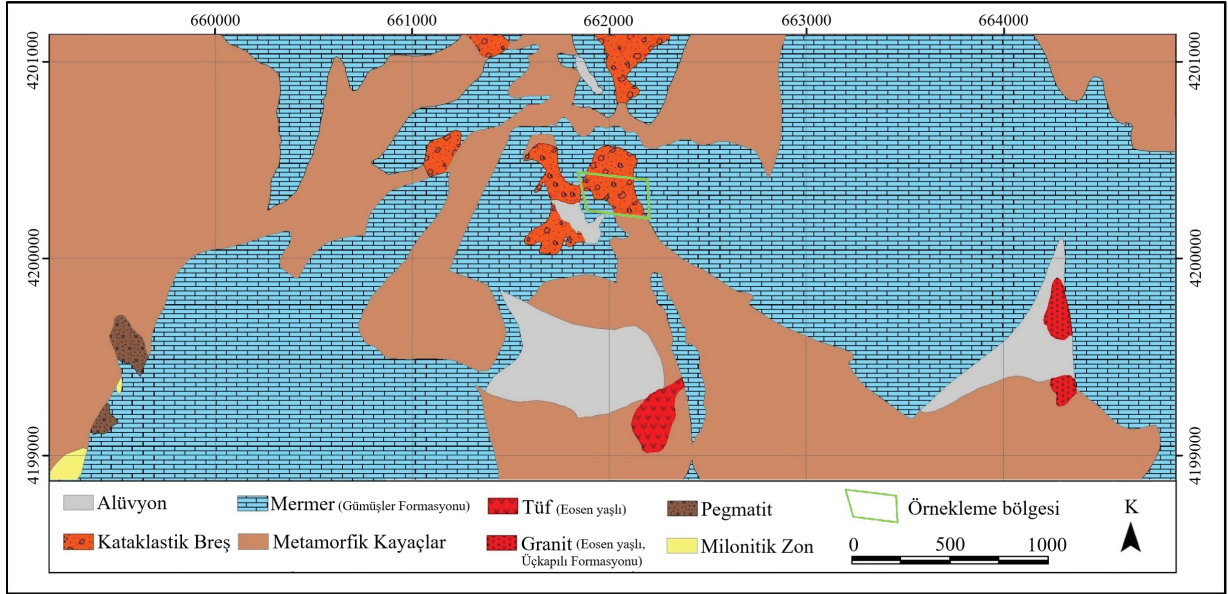
Numune Alma ve Hazırlama Çalışmaları

Çalışma sahasının güvenilir temsili açısından karakterizasyonu yapılacak numune sayısının miktarı önem arz etmektedir. Bu kapsamda, MAY (ÇSB, 2015) ve Maden Atıkları Yönetmeliğinin Uygulanmasına İlişkin Açıklamalar (MAYUİA) dokümanının “Ç. Maden Atıklarının Karakterizasyonu ve Maden Atığı Bertaraf Tesislerinin Sınıflandırılması ile İlgili Açıklamalar” başlıklı 10. maddesinde belirtilen pasa miktarına göre alınacak minimum numune sayıları çizelgesinden faydalanılmıştır (ÇŞİDB, 2018) (Çizelge 1).



Şekil 1. Çalışma sahasının konumu (Google Earth).

Figure 1. Location of the study area (Google Earth).



Şekil 2. Çalışma sahasını gösterir 1/10.000 ölçekli jeolojik harita, SRK Danışmanlık (2023) referansından değiştirilmiştir.

Figure 2. 1:10,000 scale geological map showing the study area, modified from SRK Danışmanlık (2023)

Çizelge 1. Maden kazılarında kaynaklanan atıkların/pasaların karakterizasyonu için yapılacak testler için atık miktarına göre minimum numune sayıları (ÇŞİDB, 2018).

Table 1. Minimum number of samples based on waste amount, required tests for characterization of waste/tailings originating from mining excavations (ÇŞİDB, 2018).

Pasa Miktarı (metrik ton)	Numune Sayısı
<10.000	3
<100.000	8
<1.000.000	26
<10.000.000*	80

Not: Pasa miktarı 10.000.000 metrik tondan fazla olan sahalarda en az 80 numune alınır.

2.400.000 m³ (yaklaşık 6.000.000 ton) pasa/yan kayaç çıkacağı öngörüldüğü için karakterizasyonu yapılacak asgari numune sayısı 80 olarak belirlenmiştir. Madencilik faaliyetlerinin planlandığı sahada majör olarak mermer, granit, kataklastik breş ve metamorfik kayaç birimleri yer almaktadır. Bu kapsamda, cevher modelinde potansiyel pasa olarak

tanımlanan karot kesitlerinden her biri yaklaşık 2 kg olan toplam 84 adet numune jeolojik formasyon kaynağı dikkate alınarak mekânsal ve derinlik dağılımlı olarak belirlenerek örneklenmiştir. Sahanın potansiyel pasa kompozisyonu, pasa miktarları ve birimlere göre rölatif dağılım Çizelge 2 içerisinde verilmektedir.

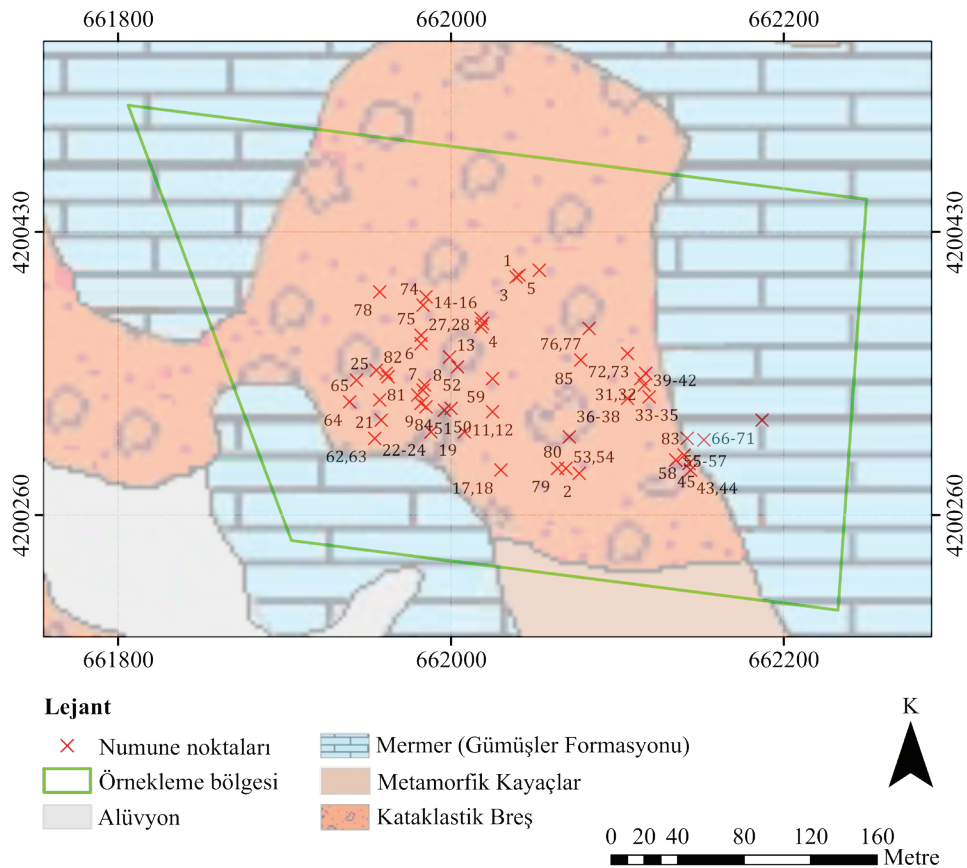
Çizelge 2. Baskın litolojilerin miktarına göre numunelerin sayısı ve litolojik dağılımları.

Table 2. Sample count and lithological distribution by the quantity of dominant lithologies.

Pasa	Hacim	Miktar ^a	Dağılım	Numune Sayısı
Baskın Litoloji	m ³	Ton	%	Toplam
Mermer	1.084.800	2.712.000	45,2	38
Şist	799.200	1.998.000	33,3	28
Breş	170.400	426.000	7,1	6
Kuarsit	170.400	426.000	7,1	6
Moloz	144.000	360.000	6,0	5
Granodiyorit	28.800	72.000	1,2	1
Toplam	2.400.000	6.000.000	100,0	84

^a: Kayaç/pasa yoğunluğu 2,5 kg/m³ olarak alınmıştır (SRK Danışmanlık, 2023)

Örnekleme bölgesinden alınan 84 adet numunenin konumları Şekil 3 içerisinde sunulmaktadır.



Şekil 3. Örnekleme bölgesinden alınan numunelerin konumları.

Figure 3. Locations of samples taken from the sampling zone.

Ağaç, Çelebi, Öncel

Çizelge 3. Numunelerin koordinat, derinlik-kesit ve jeolojik bilgileri.

Table 3. Coordinate, depth-section and geological information for the samples.

Numune Adı	Koordinat Bilgileri (UTM, ED-50)		Kesit (m)	Baskın Litoloji	Ayrışım Zonu	Numune Adı	Koordinat Bilgileri (UTM, ED-50)	Kesit (m)	Baskın Litoloji	Ayrışım Zonu
	X	Y					X	Y		
NOP-1	662048	4200397	0	2,5	Oksitli	NOP-44	662151	4200280	4,2	9,8
NOP-2	662084	4200278	0	2,6	Oksitli	NOP-45	662150	4200284	0	9,1
NOP-3	662046	4200396	0	2,2	Oksitli	NOP-46	662154	4200293	6,5	11,4
NOP-4	662026	4200368	0	7,6	Oksitli	NOP-47	662156	4200296	11,8	20
NOP-5	662060	4200400	16,2	27,7	Oksitli	NOP-48	662159	4200298	20	22
NOP-6	661989	4200356	0	9,8	Oksitli	NOP-49	662161	4200300	22	30
NOP-7	661991	4200331	38,7	49	Oksitli	NOP-50	662007	4200317	13	20,5
NOP-8	NOP-8	662006	4200348	29	Oksitli	NOP-51	662003	4200316	20,5	37
NOP-9	661989	4200320	22,2	25	Oksitli	NOP-52	662011	4200342	51	57
NOP-10	661987	4200325	25	31	Oksitli	NOP-53	662076	4200281	0	11,1
NOP-11	662032	4200315	34,7	40,5	Oksitli	NOP-54	662076	4200281	11,1	17
NOP-12	662032	4200315	40,5	48	Oksitli	NOP-55	662144	4200287	0	7,5
NOP-13	662025	4200366	0	10	Oksitli	NOP-56	662142	4200286	7,5	9,5
NOP-14	662025	4200371	0	5,5	Oksitli	NOP-57	662141	4200286	9,5	10,9
NOP-15	662025	4200371	5,5	12,3	Oksitli	NOP-58	662147	4200289	4,5	9
NOP-16	662025	4200371	12,3	17,4	Oksitli	NOP-59	662032	4200335	37,4	44,5
NOP-17	662037	4200280	0	8	Oksitli	NOP-60	661964	4200322	17	21
NOP-18	662037	4200280	8	15,6	Oksitli	NOP-61	661964	4200322	24	34
NOP-19	662015	4200303	16	33,3	Oksitli	NOP-62	661961	4200299	0	3,9
NOP-20	661990	4200328	34	41	Oksitli	NOP-63	661960	4200301	3,9	7
NOP-21	661965	4200310	10,1	20,5	Oksitli	NOP-64	661946	4200321	31,5	47,5
NOP-22	661995	4200303	26,2	34	Oksitli	NOP-65	661950	4200334	22,5	28
NOP-23	661995	4200303	15,3	26,2	Oksitli	NOP-66	662194	4200310	0	9,1
NOP-24	661995	4200303	0	14	Oksitli	NOP-67	662194	4200310	9,1	10,5
NOP-25	661962	4200340	59	74	Oksitli	NOP-68	662194	4200310	10,5	13,8
NOP-27	661989	4200361	0	12,3	Oksitli	NOP-69	662194	4200310	13,8	16
NOP-28	661989	4200361	12,3	22,9	Oksitli	NOP-70	662194	4200310	16	18,7
NOP-29	662121	4200335	0	3	Oksitli	NOP-71	662194	4200310	18,7	20
NOP-30	662121	4200335	3	8	Oksitli	NOP-72	662114	4200347	16,9	19,6
NOP-31	662123	4200331	8	10,1	Oksitli	NOP-73	662113	4200350	19,6	29,5
NOP-32	662123	4200330	10,1	12,4	Oksitli	NOP-74	661992	4200384	0	3,6
NOP-33	662123	4200327	12,4	17,3	Oksitli	NOP-75	661990	4200379	3,6	16,5
NOP-34	662125	4200326	17,3	18,1	Sülfürlü	NOP-76	662090	4200365	0	2,25
NOP-35	662126	4200324	18,1	23,5	Geçiş	NOP-77	662089	4200363	2,25	15,5
NOP-36	662115	4200325	8	11,5	Oksitli	NOP-78	661964	4200387	1,6	4
NOP-37	662113	4200323	11,5	16,1	Oksitli	NOP-79	662071	4200281	11,1	20,5
NOP-38	662112	4200320	16,1	21	Oksitli	NOP-80	662078	4200300	19,7	24
NOP-39	662121	4200335	0	3,5	Oksitli	NOP-81	661969	4200336	6,6	11,5
NOP-40	662122	4200336	3,5	4,5	Geçiş	NOP-82	661968	4200338	26,5	32
NOP-41	662123	4200337	4,5	9,2	Oksitli	NOP-83	662149	4200299	17,2	22
NOP-42	662124	4200338	9,2	11	Geçiş	NOP-84	661992	4200318	19,7	26,4
NOP-43	662151	4200280	0	4,2	Oksitli	NOP-85	662085	4200346	29,8	34,8

Örnekleme prosedürüne ait görseller ve alınan numunelerin koordinat ve derinlik-kesit bilgileri ise sırasıyla Şekil 4 ve Çizelge 3 içerisinde verilmektedir.

Numuneler karakterizasyon süreçleri öncesinde çeneli kırıcı ve öğütücü yardımıyla 63 μm tane boyu altına getirilmiş ve ardından 105°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Seçili numunelere, X-ışını Difraksiyonu (XRD) kalitatif mineraloji prosedürünün yanı sıra, asit üretim ve tüketim potansiyellerinin tahmini için ABH prosedürü uygulanmıştır.

Sülfür Kükürdü Analizleri

Potansiyel yan kayaç numunelerinin karakterizasyonuna öncelikle sülfür kükürdü ve karbon içeriklerinin belirlenmesi ile başlanmıştır. İlk olarak, numunelerin TS ve toplam karbon (TC) içerikleri Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarlarında, en fazla kabul gören metot olan kızılotesi spektroskopisi tekniği ile LECO CS844

marka ve model cihaz ile belirlenmiştir (Çelebi ve Ribeiro, 2023). Daha sonra, sülfür formları, Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü (GTÜ YDB) laboratuvarlarında yürütülen EPA-600/12-78-054 ve ASTM 1915-20 prosedürleriyle saptanmıştır. Bu kapsamda, HCl ile ekstrakte edilebilir sülfür (çoğunlukla sülfatlar, TSO_4^{2-}), nitrik asit (HNO_3) ile ekstrakte edilebilir sülfür (çoğunlukla sülfidler, TS^{2-}) ve ekstrakte edilemeyen sülfür (çoğunlukla organik S, TS^0) formları belirlenmiştir. Bir huniye konumlandırılmış 391 derece filtre kâğıdı (3 μm) içerisine alınan 0,5 gram örnekler ayrı setlerde konsantre HCl (2 birim hacim HCl ile 3 birim hacim su karışımı, 2:3) ve HNO_3 (1 birim hacim HNO_3 ile 7 birim hacim su karışımı, 1:7) çözeltileri ile damlalar halinde ve bir gece bekletilerek muamele edilmiştir. Kalıntı örneklerin TS içerikleri LECO CS844 cihaz ile ölçülmüş ve başlangıç TS değerlerinden çıkartılarak sülfür formları konsantrasyonları tespit edilmiştir. Sülfür formları arasındaki temel kütle bağıntısı Eşitlik (1) içerisinde verilmektedir (Çelebi ve Ribeiro, 2023).



Şekil 4. Sondaj loglarından çıkarılan karotlardan yürütülen yan kayaç örnekleme sürecine ait görseller.

Figure 4. Images of the wall-rock sampling process on cores extracted from drilling logs.

$$TS^0 \% = TS \% - (TSO_4^{2-} + TS^{2-}) \quad (1)$$

Yürütülen sülfür kükürdü analizleri (EPA-600/12-78-054, ASTM 1915-20) sonucunda TS^{2-} miktarı %0,1 üstünde tespit edilen yan kayaç numunelerine statik testler uygulanmıştır.

Asit-Baz Hesaplama

Sülfür kükürdü analizleri sonucunda %0,1 altında TS^{2-} içeriği saptanan numuneler için MAYUİA dokümanında statik test gerekli olmadığı belirtilmektedir. TS^{2-} kükürdü içeriği %0,1 mertebesinin üzerinde tespit edilen numuneler için ise ABH prosedürlerinin uygulanması gerekliliği bildirilmektedir. Bu kapsamda, numunelerin AP ve NP değerleri GTÜ YDB laboratuvarlarında Modifiye Sobek yöntemi ile belirlenmiştir (Lawrence ve Wang, 1997). Modifiye Sobek yöntemi ile AP değerleri Eşitlik (2) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Modifiye Sobek AP (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \% TS^{2-} \times 31,25 \quad (2)$$

Ancak TS^{2-} kükürdü içeriği %0,1 altında kalan numuneler için genel bir değerlendirme yapmak açısından Sobek yöntemi ile AP değerleri de Eşitlik (3) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Sobek AP (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \% TS \times 31,25 \quad (3)$$

Numunelerin NP değerleri ise iki farklı yöntem ile tahmin edilmiştir. İlk olarak, modifiye Sobek NP olarak adlandırılan yöntemde Sobek yöntemine göre agresifliği daha az asit konsantrasyonu ile örnek 24 saat boyunca 25-35 °C aralığında muamele edilmekte ve süre sonunda uygun konsantrasyonda bir baz ile (genellikle NaOH) pH 8,3 mertebesine kadar geri titrasyon uygulanmaktadır (Sobek yönteminde pH 7,0 mertebesine kadar). Titrasyonda sarfiyat not edilerek ABH yapılmaktadır. Sobek NP testinden kaynaklı NP'nin aşırı tahmin edilme hataları Modifiye Sobek NP yöntemi ile asgari

düzeğe indirilmiştir (Lawrence ve Wang, 1997). Analiz sürecinde Modifiye Sobek yöntemi ile NP değerleri Eşitlik (4) ile saptanmıştır.

$$NP \text{ (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \frac{(V_a \times N_a) - (V_b \times N_b) \times 50}{\text{Alınan örnek miktarı (g)}} \quad (4)$$

Burada V_a , kullanılan asit hacmi (mL); N_a , asit normalitesi; V_b , baz sarfiyatı (mL); N_b , baz normalitesi; şeklinde tanımlanmaktadır. Çalışmada bu kapsamda 0,25 M HCl ve 0,11 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır.

İkinci yöntem olarak, numunelerin karbonat NP değerleri TC içeriğinden stokiometrik olarak CaCO_3 eşdeğerliğinde Eşitlik (5) ile tespit edilmiştir (Price, 2009).

$$\text{Karbonat NP (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \% TC \times 83,4 \quad (5)$$

Karbonat NP hesaplaması, statik testlere girmeyen TS^{2-} kükürdü miktarı %0,1 altında tespit edilen pasa numunelerinin NP değerlerinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Dolayısıyla elde edilen bu veriler Sobek AP verileri ile birlikte tartışılmıştır.

Numunelerin net asit üretme potansiyeli (NAP) değerleri ise AP ve NP skorlarının farkından elde edilmiştir (Eşitlik 6).

$$NAP \text{ (kg CaCO}_3\text{/ton)} = AP - NP \quad (6)$$

Mineralojik Analizler

Son yıllarda kantitatif mineraloji verileri ile asit üretim potansiyeli tahmini öne çıkmaktadır (Dold, 2017; Guseva vd., 2021; Gürtekin ve Aydar, 2023; Karlsson vd., 2018). Ancak çalışma özelinde, numunelerdeki oldukça düşük sülfür varlığı kantitatif mineraloji tekniği ile güvenilir sonuçlar alınmasını kısıtlamaktadır.

Çizelge 4. Numunelerin TS⁻² kükürdü ve TC içerikleri (%).Table 4. TS⁻² sulfur and TC contents (%) of the samples.

NOP	TS (%)	TSO ⁻² (%)	TS ⁰ (%)	TS ⁻² (%)	TC (%)	NOP	TS (%)	TSO ⁻² (%)	TS ⁰ (%)	TS ⁻² (%)	TC (%)
	A+B+C	A	B	C			A+B+C	A	B	C	
1	0,03	GD	GD	≤0,03	0,34	44	0,02	GD	GD	≤0,02	5,70
2	0,02	GD	GD	≤0,02	0,21	45	0,02	GD	GD	≤0,02	6,48
3	0,06	GD	GD	≤0,06	0,47	46	0,02	GD	GD	≤0,02	7,31
4	0,03	GD	GD	≤0,03	0,41	47	0,01	GD	GD	≤0,01	10,71
5	0,01	GD	GD	≤0,01	0,76	48	0,02	GD	GD	≤0,02	3,64
6	0,02	GD	GD	≤0,02	0,23	49	0,02	GD	GD	≤0,02	8,19
7	0,02	GD	GD	≤0,02	11,78	50	0,02	GD	GD	≤0,02	0,34
8	0,02	GD	GD	≤0,02	11,97	51	0,02	GD	GD	≤0,02	9,88
9	0,02	GD	GD	≤0,02	0,19	52	0,02	GD	GD	≤0,02	11,30
10	0,02	GD	GD	≤0,02	0,16	53	0,02	GD	GD	≤0,02	0,13
11	0,01	GD	GD	≤0,01	11,31	54	0,02	GD	GD	≤0,02	0,14
12	0,02	GD	GD	≤0,02	11,75	55	0,02	GD	GD	≤0,02	8,09
13	0,02	GD	GD	≤0,02	0,13	56	0,02	GD	GD	≤0,02	10,90
14	0,03	GD	GD	≤0,03	0,51	57	0,02	GD	GD	≤0,02	4,65
15	0,06	GD	GD	≤0,06	0,31	58	0,02	GD	GD	≤0,02	5,18
16	0,02	GD	GD	≤0,02	0,20	59	0,01	GD	GD	≤0,01	0,18
17	0,01	GD	GD	≤0,01	11,10	60	0,01	GD	GD	≤0,01	11,40
18	0,03	GD	GD	≤0,03	2,30	61	0,03	GD	GD	≤0,03	11,50
19	0,02	GD	GD	≤0,02	11,60	62	0,01	GD	GD	≤0,01	10,30
20	0,01	GD	GD	≤0,01	11,36	63	0,02	GD	GD	≤0,02	0,68
21	0,01	GD	GD	≤0,01	7,68	64	0,03	GD	GD	≤0,03	11,80
22	0,01	GD	GD	≤0,01	0,68	65	0,05	GD	GD	≤0,05	11,50
23	0,01	GD	GD	≤0,01	11,10	66	0,02	GD	GD	≤0,02	10,10
24	0,02	GD	GD	≤0,02	0,18	67	0,02	GD	GD	≤0,02	6,33
25	0,02	GD	GD	≤0,02	11,39	68	0,02	GD	GD	≤0,02	0,49
27	0,02	GD	GD	≤0,02	0,34	69	0,02	GD	GD	≤0,02	7,84
28	0,02	GD	GD	≤0,02	9,25	70	0,02	GD	GD	≤0,02	0,74
29	0,03	GD	GD	≤0,03	2,34	71	0,02	GD	GD	≤0,02	0,12
30	0,03	GD	GD	≤0,03	7,12	72	0,03	GD	GD	≤0,03	0,85
31	0,02	GD	GD	≤0,02	1,88	73	0,05	GD	GD	≤0,05	9,33
32	0,03	GD	GD	≤0,03	1,14	74	0,02	GD	GD	≤0,02	0,16
33	0,02	GD	GD	≤0,02	0,29	75	0,02	GD	GD	≤0,02	0,28
34	0,22	0,13	0,07	0,02	0,87	76	0,01	GD	GD	≤0,01	0,92
35	0,02	GD	GD	≤0,02	10,20	77	0,02	GD	GD	≤0,02	1,02
36	0,01	GD	GD	≤0,01	2,08	78	0,02	GD	GD	≤0,02	3,42
37	0,01	GD	GD	≤0,01	2,12	79	0,03	GD	GD	≤0,03	0,07
38	0,03	GD	GD	≤0,03	11,02	80	0,01	GD	GD	≤0,01	0,19
39	0,02	GD	GD	≤0,02	1,47	81	0,01	GD	GD	≤0,01	0,19
40	0,02	GD	GD	≤0,02	6,64	82	0,01	GD	GD	≤0,01	11,96
41	0,01	GD	GD	≤0,01	7,13	83	0,02	GD	GD	≤0,02	4,83
42	0,04	GD	GD	≤0,04	4,57	84	0,02	GD	GD	≤0,02	10,80
43	0,03	GD	GD	≤0,03	8,14	85	0,63	0,13	0,36	0,14	0,70
Analiz Metodu:		EPA 600/12-78-054 ve ASTM 1915-20									
Ölçüm saptama aralığı:		0,0006 ile 60 mg (Karbon ve kükürt için, LECO CS844)									
Ölçüm hassasiyeti:		0,0003 mg or %0,5 Rölatif Standart Sapma (Karbon ve kükürt için, LECO CS844)									
GD:		Gerekli değil (TS %0,1 altında tespit edildiği için sülfür formlarının belirlenmesine gerek yoktur)									
A:		HCl ile ekstrakte edilebilir sülfür (çoğunlukla sülfat içeriğini temsil eder)									
C:		HNO ₃ ile ekstrakte edilebilir sülfür (çoğunlukla sülfid içeriğini temsil eder)									
TS ⁻² kükürdü ≥ %0,1		Asit Üretme Potansiyeli Olan Maden Atığı (statik test gerekli, MAYUİA Ç. 9. Madde), (ÇŞİDB, 2018)									
TS ⁻² kükürdü ≤ %0,1		Asit Üretmeyen İnert Maden Atığı (MAYUİA Ç. 9. Madde), (ÇŞİDB, 2018)									

Bu sebeple, sahada tespit edilen her bir litolojiyi temsil eden 14 numune seçilmiş ve kalitatif mineralojileri, GTÜ Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Bruker D8 Advance marka ve model XRD cihazı ile oda sıcaklığında 40 kV işletme gerilimi ve $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu uygulanarak belirlenmiştir. Tespit edilen mineraller, majör, minör ve aksesuar mineraller olarak tanımlanmıştır.

Çok Değişkenli İstatistiksel Analizler

Çok değişkenli istatistikler, birbirinden bağımsız olarak birden fazla değişkenin aynı anda gözlemlenmesi ve analiz edilmesini kapsayan istatistik dalıdır (Çelebi, 2023, 2024). Bu bağlamda, pasa/yan kayaç örneklerinin asit üretim potansiyellerinin litolojilere göre dağılımının daha iyi anlaşılması için hiyerarşik kümeleme analizi (HCA) ve temel bileşen analizi (PCA) yapılmıştır. Değişkenler; NAP, NP/AP ve örneğin ait olduğu litolojik birim iken gözlemler incelenen numunelerdir. Numuneler, Öklidyen uzaklıklar temelinde gruplandırılmıştır. Öte yandan, korelasyon matrisi PCA kapsamında iki bileşen çıkarılarak analiz edilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Sülfür Formları

Toplam 84 adet potansiyel yan kayaç (pasa, ekonomik olmayan kayaç) numunesinin sülfür kükürdü içerikleri ASTM E1915-20 ve EPA-600/12-78-054 standartlarına göre belirlenmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4'te verilmektedir.

Yapılan analizler neticesinde toplam sülfür oranı %0,1 üzerinde 1 adet numunenin (NOP-85) olduğu tespit edilmiştir. Bu numunedeki TS^{2-}

değeri %0,14 olarak saptanmıştır. Geriye kalan 83 adet numunenin TS^{2-} kükürdü değerlerinin %0,01 ile azami %0,06 arasında değiştiği görülmektedir. Diğer yandan 84 adet numunenin TC değerleri ise %0,07 ile %11,97 arasında değişmektedir.

Mineralojik Tanımlamalar

Mineralojik analiz verileri, maden atıklarının asit üretme potansiyellerinin belirlenmesinde ve kimyasal analiz (sülfür kükürdü ve statik testler) verilerinin doğrulanması ve desteklenmesi amaçlarıyla büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda litolojik dağılım ve kimyasal analiz verileri göz önünde bulundurularak 14 numune seçilmiştir. Seçilen 14 adet (1 adet moloz, 1 adet granodiyorit, 6 adet mermer, 4 adet şist, 1 adet breş ve 1 adet kuvarsit) pasa örneğinin majör mineralojileri XRD tekniği ile belirlenmiştir. Bu numuneler içerisinde statik test gerekli görülen NOP-85 numunesi de yer almaktadır. Seçilen numunelerin majör mineralojileri Çizelge 5 içerisinde rölatif bolluk olarak verilmektedir.

Numunelerde majör ve minör olarak herhangi bir sülfürlü minerale (pirit, markazit, kalkopirit vb.) rastlanmamıştır. Aksine, kalsit ve aragonit gibi yüksek nötralizasyon potansiyeline sahip mineraller ise majör olarak tespit edilmiştir. Diğer yandan, çözünürlüğü ihmal edilebilir ya da oldukça düşük olan kuvars, albit, muskovit, rutil, anataz ve montmorillonit gibi minerallerin varlığı da saptanmıştır. Bu minerallerin hidrojeokimyasal süreçlere olan etkileri oldukça zayıftır (Çelebi ve Ribeiro, 2023; Lottermoser, 2010). Bu çerçevede, çalışma sahasında alkali (asit tüketebilir) minerallerin dominasyonu söz konusudur.

Çizelge 5. Seçilmiş yan kayaç numunelerindeki rölatif mineral bolluğu.

Table 5. Relative abundance of minerals in the selected wall rock samples.

Mineraloji	Kimyasal formül	NOP													
		3	5	8	12	24	29	34	40	58	61	71	79	82	85*
		Mol	Grd	Mr	Mr	Şst	Şst	Kvs	Mr	Mr	Brş	Mr	Şst	Mr	Şst
Kuars	SiO ₂	++++	++++	+	+	++++	++++	++++	+++	++++	+	++++	++++		++++
Muskovit	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	+++	++			+++	++	+++	+++	++		+++	++		+
Albit	Na(AlSi ₃ O ₈)	++	+++												++
Mikroklin	K(AlSi ₃ O ₈)		++												
Ortoklaz	K(AlSi ₃ O ₈)														++
Klinoklor	Mg ₅ Al(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₈														+
Rutil	TiO ₂										+				
Anataz	TiO ₂											+			
Montmorillonit	(OH) ₄ Si ₈ Al ₄ O ₂₀ .nH ₂ O												+		
Kalsit	CaCO ₃	+	+	++++	++++		+++	+	++++	++++	++++			++++	
Aragonit	CaCO ₃			+++	+++						+	+		++	
Ankerit	Ca(Fe,Mg)(CO ₃) ₂							+							
Alum-(K)	KAl(SO ₄) ₂ .12H ₂ O		++												

*Statik test gerekli görülen numune

Mol: Moloz Grd: Granodiyorit Mr: Mermer Şst: Şist Kvs: Kuvarsite Brş: Breş

Minerallerin bolluğu, majör mineraller: +++++, minör mineraller: +++, yaygın aksesuar mineraller: ++, nadir aksesuar mineraller: +

Statik Test Sonuçları

Numunelerin belirlenen %TS⁻² kükürdü değerleri incelendiğinde ulusal düzenleme gereğince sadece NOP-85 numunesi için statik testlerin gerekli olduğu anlaşılmıştır. Bu kapsamda yürütülen Modifiye Sobek AP ve NP yöntemine ek olarak Sobek AP ve karbonat NP verileri de saptanmış olup Çizelge 6 içerisinde sunulmaktadır.

NP/AP değeri 8,11 olarak tespit edilen NOP-85 potansiyel pasa numunesi ulusal regülasyona göre “Asit üretmeyen inert maden atığı” olarak tanımlanmıştır. Ancak, Sobek AP ve karbonat NP değerleri (sırasıyla 19,68 kg CaCO₃/t ve 58,38 kg CaCO₃/t) ile elde edilen NP/AP= 2,97 değeri ise NOP-85 numunesinin asit tüketebilir bölge sınırına yakın olmakla birlikte belirsiz bölgede kaldığını göstermektedir (Şekil 5, Çizelge 7).

Çizelge 6. NOP-85 numunesinin AP ve NP değerleri.

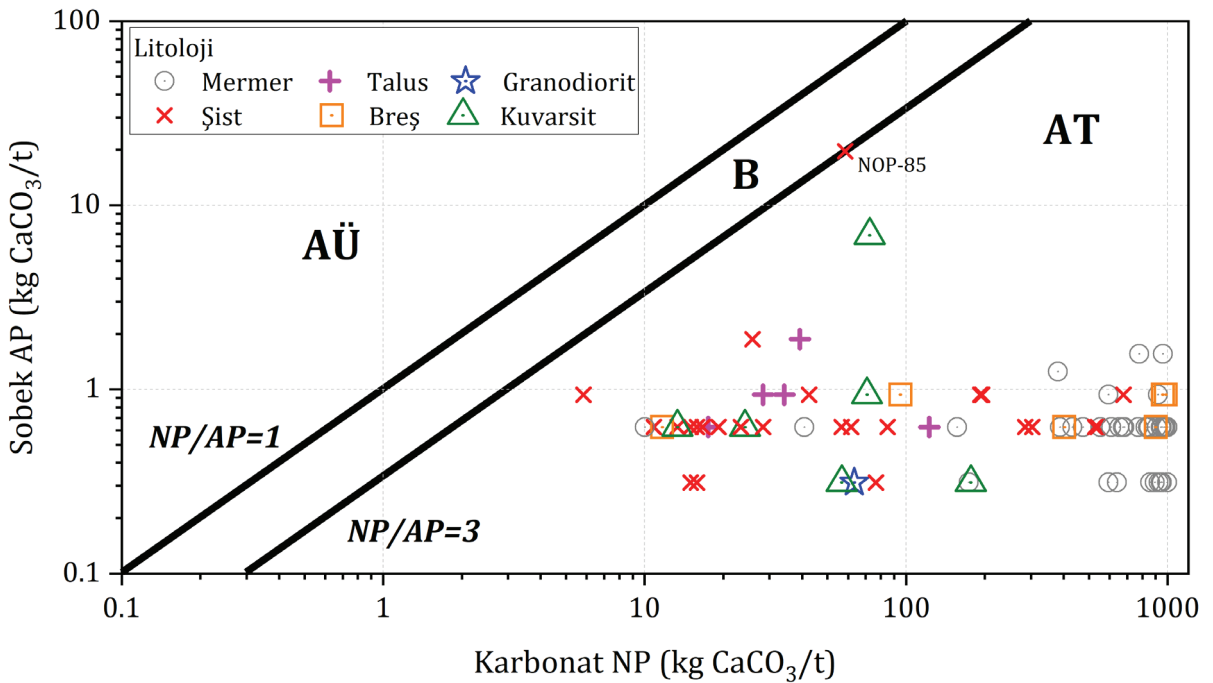
Table 6. AP and NP scores for NOP-85.

	AP	NP	NAP	NP/AP
	kg CaCO ₃ /ton			-
Metot	A	B	A-B	B/A
Modifiye Sobek AP, NP	4,38	35,5	-31,13	8,11
Sobek AP, karbonat NP	19,68	58,38	-38,7	2,97
Standart sapma	7,65	10,94	3,79	2,57
NP/AP <1	Asit üreten maden atığı (MAYUİA Ç.9)			
NP/AP >3	Asit üretmeyen inert maden atığı (MAYUİA Ç.9)			
1 < NP/AP < 3	Kinetik test gerekli (*MAYUİA Ç.9)			

Sülfürün ihmal edilemeyecek kadar fazla miktarda bulunduğu ($>0,1$) NOP-85 numunesi için Modifiye Sobek yönteminin, Sobek ve karbonat NP yöntemlerinden oluşan asit baz hesaplamalarına göre daha güvenilir ve gerçekçi olduğu düşünülmektedir (Lawrence ve Wang, 1997). Bu kapsamda, NOP-85 potansiyel pasa numunesi NP/AP 8,11 değeri ile “asit üretmeyen inert maden atığı” olarak değerlendirilmiştir.

Sülfürün oldukça düşük ($<0,06$) tespit edildiği NOP-85 harici 83 numune için Sobek AP ve Karbonat NP verilerinden elde edilen NAP ve NP/AP değerleri Çizelge 7 içerisinde sunulmuş olup Şekil 5 içerisinde NP/AP kriterine göre söz konusu numunelerin asit üretim potansiyelleri değerlendirilmiştir.

Karbonat NP - Sobek AP grafiğinden NOP-85 harici tüm numunelerin AT zonda yer aldığı görülmektedir. Litolojileri mermer olarak tanımlanan örneklerin büyük bir çoğunluğu AT zonunun en fazla asit tüketebilir (Şekil 5, sağ alt kesim) kısmında yer aldığı açıkça görülmektedir. Au-Ag cevherleşmesinin yüzeye en yakın kesitinde teşkil olan moloz birimine ait örneklerin yanı sıra kuvarsit ve granodiyorit litolojisi olarak tanımlanan örneklerin AT zonunun orta kısmında yer aldığı anlaşılmaktadır. Breş ve şist litolojisi olarak tanımlanan örneklerin ise AT zonunda farklı mertebelerde dağılım gösterdiği saptanmıştır.



Şekil 5. Numunelerin NP/AP kriteri ile asit üretim potansiyellerinin değerlendirilmesi (AÜ: Asit üretebilir, B: Belirsiz, AT: Asit tüketebilir).

Figure 5. Evaluation of acid production potential of the samples using the NP/AP criterion (NAF: non-acid forming; UC: uncertain; PAF: potentially acid forming).

Çizelge 7. Numunelerin karbonat NP ve Sobek AP verileri ile hesaplanmış NAP ve NP/AP değerleri.

Table 7. NAP and NP/AP values calculated using the carbonate NP and Sobek AP data for the samples.

NOP	TS (%)	AP _{Sobek} (°)	TC (%)	NP _{karbonat} (°)	NAP (°)	NP/AP	NOP	TS (%)	AP _{Sobek} (°)	TC (%)	NP _{karbonat} (°)	NAP (°)	NP/AP
1	0,03	0,94	0,34	28,4	-27,4	30,25	44	0,02	0,63	5,70	475,4	-474,8	760,6
2	0,02	0,63	0,21	17,5	-16,9	28,02	45	0,02	0,63	6,48	540,4	-539,8	864,7
3	0,06	1,88	0,47	39,2	-37,3	20,91	46	0,02	0,63	7,31	609,7	-609,0	975,4
4	0,03	0,94	0,41	34,2	-33,3	36,47	47	0,01	0,31	10,71	893,2	-892,9	2858
5	0,01	0,31	0,76	63,4	-63,1	202,8	48	0,02	0,63	3,64	303,6	-303,0	485,7
6	0,02	0,63	0,23	19,2	-18,6	30,69	49	0,02	0,63	8,19	683,1	-682,4	1093
7	0,02	0,63	11,78	982,5	-982	1572	50	0,02	0,63	0,34	28,4	-27,7	45,37
8	0,02	0,63	11,97	998,3	-998	1597	51	0,02	0,63	9,88	824,0	-823,4	1318
9	0,02	0,63	0,19	15,9	-15,2	25,35	52	0,02	0,63	11,30	942,4	-941,8	1508
10	0,02	0,63	0,16	13,3	-12,7	21,35	53	0,02	0,63	0,13	10,8	-10,2	17,35
11	0,01	0,31	11,31	943,3	-943	3018	54	0,02	0,63	0,14	11,7	-11,1	18,68
12	0,02	0,63	11,75	979,9	-979	1568	55	0,02	0,63	8,09	674,7	-674,1	1080
13	0,02	0,63	0,13	10,8	-10,2	17,35	56	0,02	0,63	10,90	909,1	-908,4	1455
14	0,03	0,94	0,51	42,5	-41,6	45,37	57	0,02	0,63	4,65	387,8	-387,2	620,5
15	0,06	1,88	0,31	25,9	-24,0	13,79	58	0,02	0,63	5,18	432,0	-431,4	691,2
16	0,02	0,63	0,20	16,7	-16,1	26,69	59	0,01	0,31	0,18	15,0	-14,7	48,04
17	0,01	0,31	11,10	925,7	-925	2962	60	0,01	0,31	11,40	950,8	-950,4	3042
18	0,03	0,94	2,30	191,8	-191	204,6	61	0,03	0,94	11,50	959,1	-958,2	1023
19	0,02	0,63	11,60	967,4	-967	1548	62	0,01	0,31	10,30	859,0	-858,7	2749
20	0,01	0,31	11,36	947,4	-947	3032	63	0,02	0,63	0,68	56,7	-56,1	90,74
21	0,01	0,31	7,68	640,5	-640	2050	64	0,03	0,94	11,80	984,1	-983,2	1050
22	0,01	0,31	0,68	56,7	-56,4	181,5	65	0,05	1,56	11,50	959,1	-957,5	613,8
23	0,01	0,31	11,10	925,7	-925	2962	66	0,02	0,63	10,10	842,3	-841,7	1348
24	0,02	0,63	0,18	15,0	-14,4	24,02	67	0,02	0,63	6,33	527,9	-527,3	844,7
25	0,02	0,63	11,39	949,9	-949	1519	68	0,02	0,63	0,49	40,9	-40,2	65,39
27	0,02	0,63	0,34	28,4	-27,7	45,37	69	0,02	0,63	7,84	653,9	-653,2	1046
28	0,02	0,63	9,25	771,5	-771	1234	70	0,02	0,63	0,74	61,7	-61,1	98,75
29	0,03	0,94	2,34	195,2	-194	208,2	71	0,02	0,63	0,12	10,0	-9,4	16,01
30	0,03	0,94	7,12	593,8	-593	633,4	72	0,03	0,94	0,85	70,9	-70,0	75,62
31	0,02	0,63	1,88	156,8	-156	250,9	73	0,05	1,56	9,33	778,1	-776,6	498,0
32	0,03	0,94	1,14	95,1	-94,1	101,4	74	0,02	0,63	0,16	13,3	-12,7	21,35
33	0,02	0,63	0,29	24,2	-23,6	38,70	75	0,02	0,63	0,28	23,4	-22,7	37,36
34	0,22	6,88	0,87	72,6	-65,7	10,55	76	0,01	0,31	0,92	76,7	-76,4	245,5
35	0,02	0,63	10,20	850,7	-850	1361	77	0,02	0,63	1,02	85,1	-84,4	136,1
36	0,01	0,31	2,08	173,5	-173	555,1	78	0,02	0,63	3,42	285,2	-284,6	456,4
37	0,01	0,31	2,12	176,8	-176	565,8	79	0,03	0,94	0,07	5,8	-4,9	6,23
38	0,03	0,94	11,02	919,1	-918	980,3	80	0,01	0,31	0,19	15,9	-15,5	50,71
39	0,02	0,63	1,47	122,6	-122	196,2	81	0,01	0,31	0,19	15,9	-15,5	50,71
40	0,02	0,63	6,64	553,8	-553	886,0	82	0,01	0,31	11,96	997,5	-997,2	3192
41	0,01	0,31	7,13	594,6	-594	1902	83	0,02	0,63	4,83	402,8	-402,2	644,5
42	0,04	1,25	4,57	381,1	-380	304,9	84	0,02	0,63	10,80	900,7	-900,1	1441
43	0,03	0,94	8,14	678,9	-678	724,1	85 ^b	0,63	19,69	0,70	58,4	-38,7	2,97
NP/AP <1				Asit üreten maden atığı (MAYUİA Ç.9)									
NP/AP >3				Asit üretmeyen inert maden atığı (MAYUİA Ç.9)									
1 < NP/AP < 3				Kinetik test gerekli (*MAYUİA Ç.9)									
^a				kg CaCO ₃ /ton									
^b				Modifiye Sobek NP/AP=8,11 değeri ile “asit üretmeyen inert maden atığı” olarak değerlendirilmiştir.									

Belirsiz zon sınırına (NP/AP=3,0) en yakın örnekler; NOP-79 (şist, NP/AP=6,2), NOP-34 (kuvarsit, NP/AP=10,5) ve NOP-15 (şist, NP/AP=13,8) olarak görülmektedir. Çizelge 7 incelendiğinde, baskın litolojisi mermer olarak tanımlanan 38 numunenin karbonat NP değerlerinin 156 kg CaCO₃/t mertebesinin üzerinde olduğu kantitatif olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, bazı breş ve şist olarak tanımlanan örneklerin (NOP-43, 45, 48, 61, 64, 67, 78, 84) de karbonat NP değerlerinin 285 ile 984 kg CaCO₃/t değerleri arasında olmak üzere oldukça yüksek asit tüketebilme kapasitelerine sahip oldukları da anlaşılmaktadır.

İstatistiksel Değerlendirme

Bir gözetimsiz öğrenme algoritması tekniği olan PCA, örneklerin NAP, NP/AP ve litolojik birim değişkenleri arasındaki karşılıklı ilişkileri

incelemek için kullanılmış olup istatistiksel çıktılar Çizelge 8, Çizelge 9 ve Şekil 6 içerisinde sunulmaktadır.

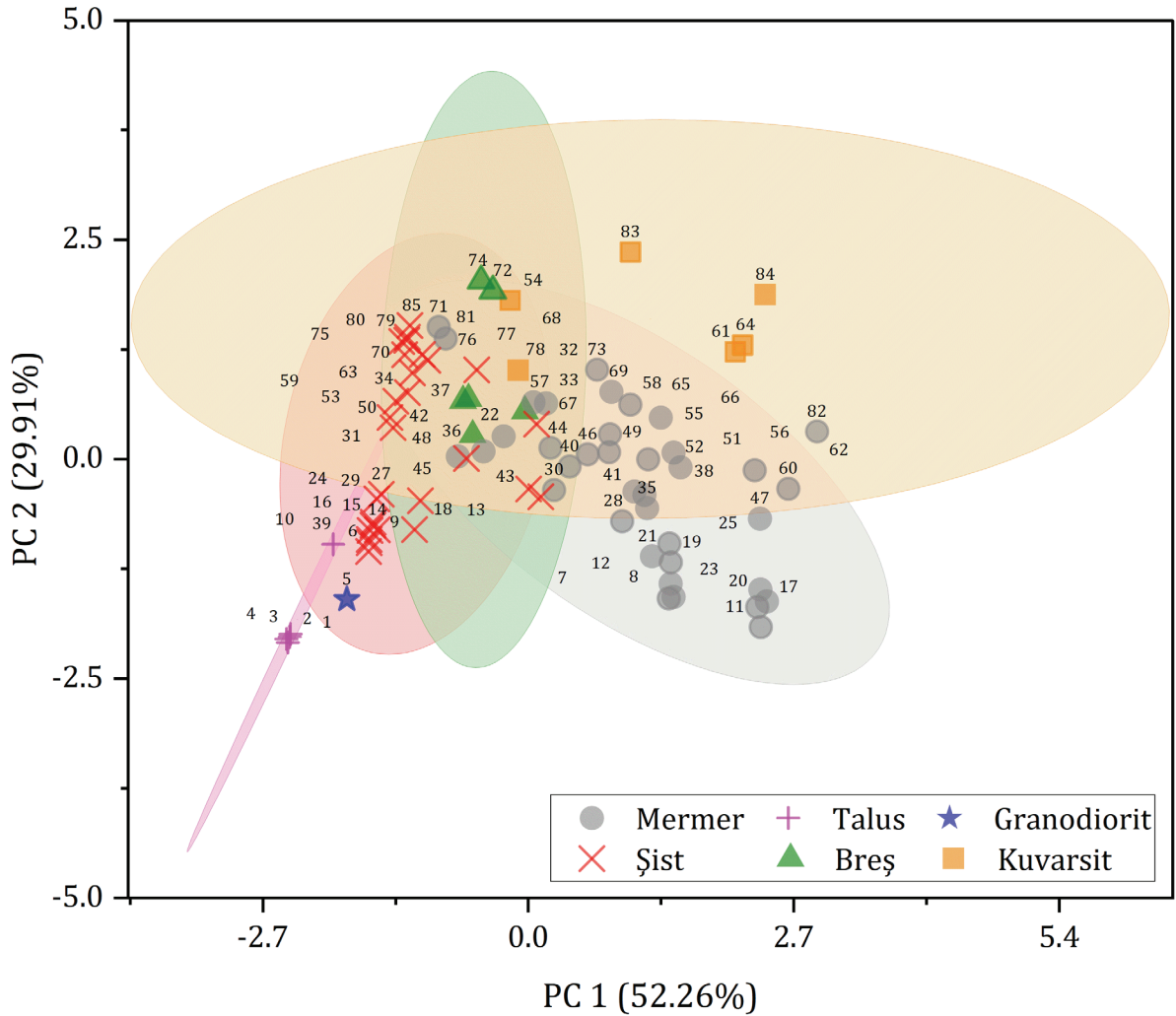
Şekil 6 incelendiğinde, asit üretim potansiyeli bakımından granodiyorit birimi numunesinin (NOP-5) moloz ve şist birimleri numuneleri kümesinde konumlandığı görülmektedir. Bu kapsamda, en dağınık elemanlı kümelerin, kuvarsit ve breş birimlerine ait numunelerden oluşan kümeler olduğu anlaşılmaktadır. Ek olarak, mermer kümesine doğru kayan bazı şist birimi numunelerinin (NOP-43, 45, 48, 67, 78) yüksek %TC değerleri (3,42-8,14 kg CaCO₃/t) ile yan kayaçlarında ciddi miktarda kalsit ve/veya aragonit mineralleri olduğu düşünülmektedir. İçlerinde en düşük asit tüketim potansiyeline sahip birimlerin ise mermer birimi kümesinin uzağında konuşlanan şist, kuvarsit ve moloz birimleri olduğu kimyasal analiz istatistiksel verileri yardımıyla da görülmektedir.

Çizelge 8. NAP, NP/AP ve litolojik birim değişkenlerine göre numunelerin PCA korelasyon matrisinin özdeğerleri.
Table 8. Eigenvalues for the CPA correlation matrix of samples according to NAP, NP/AP, and lithological unit variables.

	Özdeğer	Varyans yüzdesi	Kümülatif
1	2,09056	%52,26	%52,26
2	1,19642	%29,91	%82,17
3	0,56717	%14,18	%96,35
4	0,14586	%3,65	%100,00

Çizelge 9. NAP, NP/AP ve litolojik birim değişkenlerine göre numunelerin PCA istatistiksel verileri.
Table 9. Statistical data of PCA about samples according to NAP, NP/AP, and lithological unit variables.

Temel bileşen sayısı	Özdeğerler	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2	
		%52,26	%29,91	%52,26	%29,91	
Özdeğer	Özdeğer	Yükleme çizimi				
1	2,09056	0	0	0,44128	0,47177	Litoloji
2	1,19642	0	0	0,12706	0,80562	Numuneler
3	0,56717	0	0	0,61372	-0,29846	NP/AP
4	0,14586	0	0	-0,64224	0,19833	NAP



Şekil 6. NAP, NP/AP ve litolojik birim değişkenlerine göre numunelerin PCA görseli. Elipsler %95 güven aralığı ile tahmin edilmiştir.

Figure 6. PCA graph of samples according to NAP, NP/AP and lithological unit variables. Ellipses are predicted with 95% confidence interval.

Son olarak, Niğde Özyurt Au-Ag cevherleri yan kayaç numunelerinin (84 adet), tahmin edilen NP/AP, NAP ve litoloji değişkenlerinden benzer bileşenler sergileyen verilerinin bir küme oluşturmak üzere gruplandırıldığı HCA ile beş farklı küme içerisinde benzerlik gösterdikleri anlaşılmıştır (Şekil 7). Tamamı mermer

birimlerinden oluşan Küme 1 elemanları (NOP-62, 47, 82, 23, 17, 60, 20 ve 11) en fazla asit tüketen (NP/AP>2.750); 5 moloz, 23 şist, 5 kuvarsit, 1 granodiorit, 2 breş ve 3 mermer birimi numunesinden oluşan Küme 5 elemanları ise en az asit tüketen örnekler olarak tanımlanmıştır. Küme 2 elemanları mermer biriminden 2 adet

(NOP-21 ve 41) olup en fazla asit tüketen (NP/AP~2.000) 2. grup olarak belirlenmiştir. Küme 3 ve Küme 4 elemanlarının da ciddi mertebelerde (950-1.600 ve 300-900 kg CaCO₃/t) asit üretme potansiyeline sahip numunelerden oluştuğu söylenmelidir.

SONUÇLAR

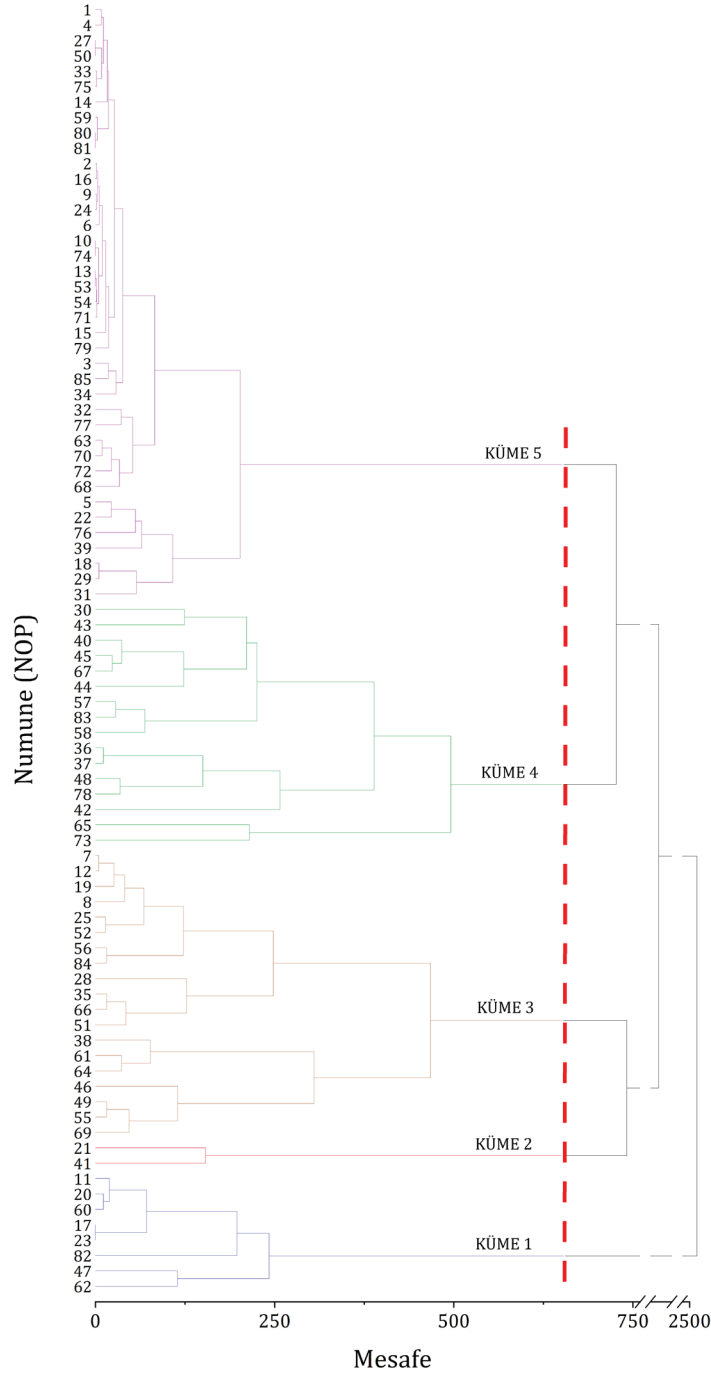
Niğde İli, Çamardı İlçesi, Özyurt-Üçkapılı köyleri civarında bulunan epitermal Tipi Au-Ag mineralizasyon sahasında yürütülen maden arama faaliyetlerinden elde edilen karotlardan potansiyel pasa/yan kayaçları temsil edecek şekilde toplamda 84 numune (38 mermer, 28 şist, 6 breş, 6 kuvarsit, 5 moloz, 1 granodiyorit litolojik birimlerine ait) seçilip örneklenmiştir. Numunelerin Türkiye’de Çevre Mevzuatı kapsamında yer alan MAY çerçevesinde asit üretme potansiyellerinin ASTM E1915-20 ve EPA-600/12-78-054 standartları ile belirlenmesi ve karakterize edilmesi hedefiyle yürütülen kimyasal ve mineralojik analizlere ait sonuçlar ve istatistiksel değerlendirmeler maddeler halinde özetlenmektedir;

- Toplam 84 adet numunenin ilk olarak %TS²⁻ ve %TC içerikleri belirlenmiştir. %TS²⁻ kükürdü içerikleri %0,1’in altında kalan (%0,01-0,06 aralığında) 83 numune “asit üretmeyen inert maden atığı” olarak; %0,1’in üstünde kalan 1 numune (NOP-85) ise “asit üretme potansiyeli olan maden atığı” olarak tanımlanmıştır. %TS²⁻ kükürdü içeriği %0,1’in üstünde olan bu numune için Sobek, Modifiye Sobek ve ASTM E1915’e göre statik testler uygulanmıştır. Bu numuneye uygulanan statik testler sonucuna göre NP/AP değeri 8,11 olarak tespit edilmiş

olup “asit üretmeyen inert maden atığı” olarak tanımlanmıştır. Numunelerin %TC değerleri ise %0,07 ile 11,97 aralığında saptanmış olup ciddi mertebelerde alkalinite üretebilecekleri anlaşılmıştır.

- Pasa/yan kayaç numuneleri mineralojisinde asit üretme potansiyeli olan sülfütlü minerallerin yoksunluğu ve/veya azlığının yanı sıra kalsit ve aragonit gibi alkali minerallerin majör (sahanın majör olarak mermer litolojisinde olması); çözünürlüğü ihmal edilebilir ya da oldukça düşük olan kuvars, albit, muskovit, rutil, anataz ve montmorillonit gibi minerallerin minör olarak varlıkları kimyasal analiz verilerini doğrular niteliktedir.
- Karbonat NP - Sobek AP grafiğinden NOP-85 harici tüm numunelerin asit tüketebilir bölgede yer aldığı saptanmıştır.
- PCA ile en düşük asit tüketim potansiyeline sahip numunelerin şist, kuvarsit ve moloz birimlerine ait olduğu; en yüksek asit tüketim potansiyeline sahip numunelerin ise beklendiği gibi mermer birimine ait olduğu saptanmıştır.
- HCA ile numunelerin asit üretim potansiyellerinin beş farklı kümede benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, ulusal düzenlemeler gereğince yürütülen kimyasal analiz (sülfid kükürdü analizleri ve statik testler) sonuçlarına göre, TS²⁻ içeriği %0,1 altında olan 83 adet ve statik test sonucunda NP/AP değeri 3,0 üzerinde (NP/AP=8,11) tespit edilen 1 adet olmak üzere toplam 84 adet pasa/yan kayaç numuneleri (incelenen tüm yan kayaç numuneleri) “Asit Üretmeyen İnert Maden Atığı” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 7. NAP, NP/AP ve litolojik birim değişkenlerine göre numunelerin hiyerarşik kümelenmesi.

Figure 7. Hierarchical clustering of the samples according to NAP, NP/AP and lithological unit variables.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, AR-GE-22-245 numaralı Gebze Teknik Üniversitesi, Teknoloji Transfer Ofisi (GTÜ-TTO) Ar-Ge projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar, örnekleme sürecindeki yardımlarını esirgemeyen “Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. personellerine” en içten teşekkürlerini sunar.

YAZAR KATKI BEYANI

Gerçekleştirilen çalışmada Cansın AĞAÇ, örnekleme, kavramsallaştırma, literatür taraması, orijinal taslak yazımı, finansman edinimi ve kullanılan malzemelerin temin edilmesi hususlarında; Emin Ender ÇELEBİ, örnekleme, kavramsallaştırma, metodoloji, veri düzenleme, orijinal taslak yazımı, yazım inceleme ve düzenleme, görselleştirme, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Mehmet Salim ÖNCEL, proje yönetimi, süpervizyon, örnekleme, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi hususlarında katkı sunmuşlardır.

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Ağaç, C. (2021). *Balıkesir ili, Balya ilçesi sınırlarında bulunan kurşun, çinko, bakır işletmesi zenginleştirme atıkları ile terk edilmiş Fransız maden atıklarının doğal şartlar altında asit maden drenajı oluşturma potansiyelinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ağaç, C., Çelebi, E. E., Öncel, M. S. (2021). Balya İlçesindeki Terkedilmiş ve Düzenli Depolanan Pb/Zn Flotasyon Atıklarının Saha Şartlarında Yürütülen Kolon Kinetik Testleri ile Asit Üretme Potansiyellerinin Belirlenmesi. 5. *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu*, 50, Kocaeli, Türkiye.
- Akcil, A., Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>.
- Balci, N., Demirel, C. (2018). Prediction of Acid Mine Drainage (AMD) and Metal Release Sources at the Küre Copper Mine Site, Kastamonu, NW Turkey. *Mine Water and the Environment*, 37, 56-74. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0470-4>.
- Bruynesteyn, A., Duncan, D. W. (1979). Determination of acid production potential of waste materials. *AIME Annual Meeting, paper (A-79-29)*, New Orleans, USA, 19–21 February.
- Çelebi, E. E. (2022). Shortcomings of Waste Characterization Methods Applied in accordance with the Mining Waste Regulation in Turkey and Suggestions for the Most Appropriate Method. *2nd International Congress on Scientific Advances (ICONSAD'22)*, Online, 618-619.
- Çelebi, E. E. (2023). Balya Pb/Zn Flotasyon Atığının BCR Sıralı Ekstraksiyon Tekniği ile Metal Türleşmesinin Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 12(4), 1409-1416. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1314247>.
- Çelebi, E. E. (2024). Determination of metal fractions and rare earth anomalies in red mud: the case of bauxite mining district of Seydişehir (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 83, 93. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11409-w>.
- Çelebi, E. E., Öncel, M. S. (2016). Determination of acid forming potential of massive sulfide minerals and the tailings situated in lead/zinc mining district of Balya (NW Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 124, 487-496. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.014>.
- Çelebi, E. E., Öncel, M. S., Kobya, M. (2018). Acid production potentials of massive sulfide minerals and lead–zinc mine tailings: a medium-term study. *Water Science and Technology*, 77(1), 260-268. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.541>.
- Çelebi, E. E., Ribeiro, J. (2023). Prediction of acid production potential of self-combusted coal

- mining wastes from Douro Coalfield (Portugal) with integration of mineralogical and chemical data. *International Journal of Coal Geology*, 265, 104152. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104152>.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>.
- Finkelman, R. B., Giffin, D. E. (1986). Hydrogen peroxide oxidation: an improved method for rapidly assessing acid-generating potential of sediments and sedimentary rocks. *Reclamation and Revegetation Research*, 5(4), 521-534.
- Guseva, O., Opitz, A. K. B., Broadhurst, J. L., Harrison, S. T. L., Becker, M. (2021). Characterisation and prediction of acid rock drainage potential in waste rock: Value of integrating quantitative mineralogical and textural measurements. *Minerals Engineering*, 163, 106750. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106750>.
- Gürtekin, G., Aydar, E. (2023). Quantitative Mineralogy in Characterization of Historical Tailings: A Case from the Abandoned Balya Pb–Zn Mine, Western Turkey. *Natural Resources Research*, 32, 195-212. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10128-6>.
- Kalyoncu Erguler, G., Erguler, Z. A., Akcakoca, H., Ucar, A. (2014). The effect of column dimensions and particle size on the results of kinetic column test used for acid mine drainage (AMD) prediction. *Minerals Engineering*, 55, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.008>.
- Karlsson, T., Räisänen, M. L., Lehtonen, M., Alakangas, L. (2018). Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 719. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7096-2>.
- Korkanç, M., Şener, T., Doğan, B., Başkara, T. (2017). Gümüşler-Aktaş (Niğde) Bölgesinin Genel Jeolojisi ve Yapı Malzemesi Potansiyeli. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 132-139. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.297983>.
- Lapakko, K. A. (1992). Characterization and Static Testing of Ten Gold Mine Tailings. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, 370-384.
- Lawrence, R. W., Poling, G. W., Ritcey, G. M., Marchant, P. B. (1989). *Assessment of Predictive Methods for the Determination of AMD Potential in Mine Tailings and Waste Rock, Tailings and Effluent Management*. Proceedings Symposium on Tailings and Effluent Management, Editörler: Chalkley ME vd., New York, Halifax: Pergamon Press.
- Lawrence, R. W., Wang, Y. (1997). Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage. *4th International Conference on Acid Rock Drainage*, 449-464, Vancouver, Canada.
- Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. İçinde *Mine Wastes (Third Edition): Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Berlin, Heidelberg, Germany.
- Price, W. A. (2009). *Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials*. MEND Report 1.20.1, Canada.
- Sanliyüksel Yucel, D. (2019). Characterization and comparison of mine wastes in Can Coal Basin, northwest Turkey: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, 154. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8160-0>.
- Sanliyüksel Yucel, D., Baba, A. (2016). Prediction of acid mine drainage generation potential of various lithologies using static tests: Etili coal mine (NW Turkey) as a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 473. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5462-5>.
- Shu, W. S., Ye, Z. H., Lan, C. Y., Zhang, Z. Q., Wong, M. H. (2001). Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, 26(5-6), 389-394. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(01\)00017-4](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(01)00017-4).
- Sobek, A. A., Schuller, W. A., Freeman, J. R., Smith, R. M. (1978). *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils*.

Environmental Protection Technology Series, EPA-6002-78-054, US National Technical Information Service Report, 280-495.

SRK Danışmanlık. (2023). *201901076 Ruhsat Nolu IV. Grup Maden Ocağı Projesi Nihai Proje Tanıtım Dosyası*. Niğde.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü (2018). <https://cygm.csb.gov.tr/maden-atiklari-yonetmeliginin-uygulanmasina-iliskin-aciklamalar-duyuru-342821>. 1 Haziran 2018.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇSB). (2015). Maden Atıkları Yönetmeliği. İçinde *T.C. Resmî Gazete* (Sayı 29417, 15 Temmuz 2015). Başbakanlık Basımevi.

White III, W. W., Lapakko, K. A., Cox, R. L. (1997). Static-Test Methods Most Commonly Used to Predict Acid-Mine Drainage: Practical Guidelines for Use and Interpretation. İçinde G. S. Plumlee, M. J. Logsdon, L. F. Filipek (Ed.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits: Part A: Processes, Techniques, and Health Issues*; Reviews in Economic Geology; Plumlee GS, Logsdon MJ, Editörler: Society of Economic Geologists: Littleton, CO, USA, 325–338.