

SÜLFÜRLÜ MADENLERİN ÇEVRE SORUNU: ASİT MADEN DRENAJİ

Mehmet KARADENİZ*

GİRİŞ

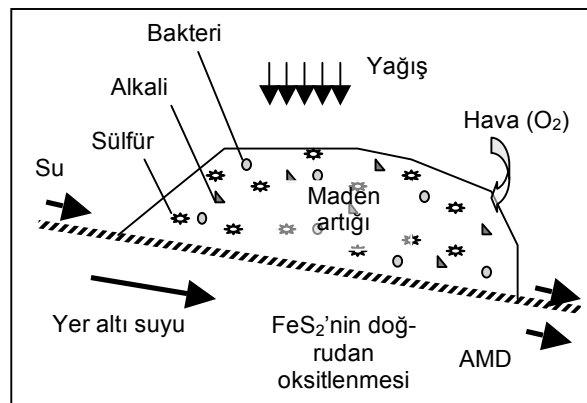
Madencilik faaliyetleri ile ilintili çevre sorunları; madenlerin çeşitlilik göstermesi, farklı biçimlerde ve yapılarda yataklanması, üretim ve zenginleştirilmelerinde zorunlu olarak birbirinden ayrı yöntemler uygulanması gibi nedenlerle, yerel şartlara da bağlı olarak geniş bir yelpazede değişkenlik göstermektedir. Ancak alıcı ortamlar açısından bakıldığında, sularla maden üretimi arasında sıkı ve yoğun bir ilişki olduğu için, hiç kuşkusuz en ciddi sorun su kirliliğidir. Bünyesinde demir sülfür mineralleri bulunan sahalarda görülen asit maden drenajı (AMD) ise; değişik tür madenlerde ortaya çıkabilmesi (yaygınlığı), uzun mesafelere kolayca taşınabilmesi (hareketliliği) ve etkinliğini yıllar boyunca sürdürebilmesi (devamlılığı) dolayısıyla diğerlerinden ayrılmaktadır.

AMD'nin belirgin özellikleri çok düşük pH, yüksek metal konsantrasyonu, yüksek oranda çözünmüş katı ve askıda katı içeriğidir. Böylelikle, AMD dereler, çaylar, nehirler ve göller gibi alıcı ortamlara karıştığında, söz konusu alandaki canlı yaşamı olumsuz yönde etkilenebilir. Hatta kimi türler tamamen yok olabilir, bağlantılı olarak besin zinciri zamanla zayıflayabilir ve neticede ekosistem çökebilir.

Görüldüğü üzere, AMD sık karşılaşılan, etki alanı geniş ve uzun süreli bir çevre kirliliği sorunudur. İlâveten, oluşum başladıktan sonra engellenmesi güç, çözümü ise yüksek maliyetlidir. Buna göre, henüz daha oluşumu başlamadan önlenmesi, ekonomik ve teknik açıdan bir gerekliliktir.

ASİT MADEN DRENAJİ KAVRAMI

AMD, bir sülfürlü maden sahasındaki kayaç yığınlarında, cevher ve pirit konsantrasyonu stoklarında ve artıkların terk edildiği barajlarda pirit, pirotin ve markazit gibi bir demir sülfür mineralinin nemli ortamda oksitlenmeye maruz kalmasıyla tetiklenen tepkimeler sonucu, sulu ortama proton (H^+) geçmesi ve çözeltinin asidik niteliğe bürünmesidir (Şekil 1).



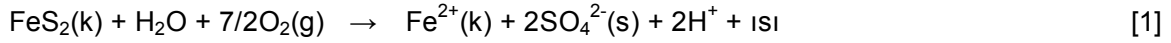
Şekil-1 AMD oluşumunun şematik gösterimi (BCAMDTF, 1989).

* MTA Genel Müdürlüğü, Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi, Ankara

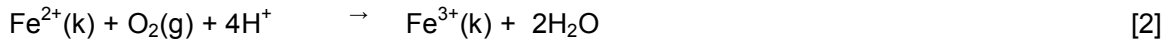
Asidik drenaj madencilik faaliyetleri dışında ya yol, baraj ve havaalanı gibi büyük çaplı inşaatlar veya doğada insan etkisi olmaksızın demir şapka (gossan) oluşumu esnasında da gelişebilir. Bu süreçler ise asit kaya drenajı (AKD) olarak adlandırılır.

Oluşumu

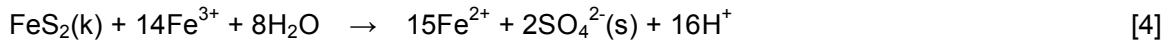
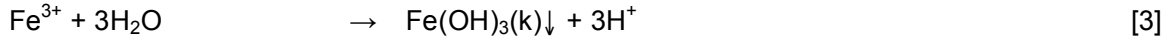
AMD esas itibarıyla, başlangıçta belirli bazı minerallerin çözünmesi, ardından katı hale geçerek çökmesi ve yeniden çözünmesi şeklinde gelişen süreçler dizisidir. Genellikle ilk oksitlenen en yaygın demir sülfür minerali olan pirittir. Sülfür içeren sfalerit, kovellin, kalkopirit, arsenopirit, stibinit, millerit gibi sair metalik mineraller daha sonraki aşamalarda çözünerek asiditeye katkı yapar.



Ortamın oksitleme potansiyeli yüksekse, Fe^{2+} yükselgenip, Fe^{3+} 'e dönüşür.

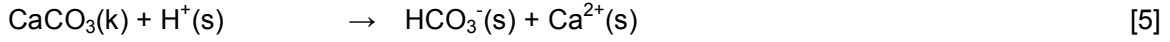


Fe^{3+} kuvvetli bir oksitleyicidir. Bir kısım Fe^{3+} OH^- ile bileşik yapıp sarıdan kırmızıya, turuncudan kahverengiye renk alarak (Şekil 2) çökerken ([3] numaralı tepkime), bir kısmı da piritin oksitlenmesine katkı yapar.



Şekil-2 Bakır pasasından çözünen demir sülfürlerin preipitasyonu ile oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ çökeltileri (yellow boy), (Maden-Elazığ Atabey, 2010).

Böylelikle asit meydana gelir. Ama bütün mineraller aynı doğrultuda davranış sergilemez. AMD, asit üreten minerallerle nütürleştiren minerallerin etkilerinin bileşkesidir. Bazı sülfürler asit üretimine yardımcı olurken, kimi karbonat mineralleri (kalsit ve dolomit gibi) nütürleştirici rolü oynar ([tepkime 5]), bazı silikatlar da tampon etkisi yaratır.



Asidin oluşumu ve nütürleşmesi burada verilen kimyasal süreçten çok daha karmaşık bir olgudur. Çünkü gelişmeleri bir şekilde hızlandıran, yavaşlatan veya engelleyen çok sayıda faktör vardır.

Oluşumu etkileyen faktörler

Asidik drenaj oluşumunun temel şartı, üç temel öge konumundaki demir sülfür, oksijen (hava) ve nemin (su) eş zamanlı bir araya gelmesidir. Sonrasında, tepkimeleri doğrudan ya da dolaylı biçimde etkileyen veya kontrol eden faktörler devreye girer. İlk üçüyle birlikte, sülfür oksitlenme ürünlerinin oluşumunda bizatihi rol oynayan mikroorganizmalar, pH, sıcaklık ve $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ denge durumu diğer birincil faktörler olarak addedilir. Asidi nütürleştiren veya meydana gelen ürünlerle tepkimeye giren karbonat ve silikat mineralleri ikincil faktörlerdir. Yığını oluşturan malzemenin tane boyutu, yüzey alanı, gözeneklilik, geçirgenlik, gevreklik gibi fiziksel özellikleri ile işletmenin bulunduğu bölgenin iklim ve diğer coğrafik nitelikleri üçüncül faktörler olarak değerlendirilmektedir (EPA, 1994; Environment Australia, 1997). Paktunç (1998) ise bunları, kaynak faktörler (asit üreten ve nütürleştiren minerallerin fiziksel ve mineralojik özellikleri) ve çevresel ve diğerleri (iklim, hidrolojik koşullar, yığın hacmi gibi) olmak üzere ikiye ayırmaktadır.

Oluşumun diğer mekanizmaları

AMD'nin oluşum süreci, daha önce verilen ve kimyasal mekanizmayı ifade eden ve minerallerin asit üreten veya asit nütürleştiren tepkimelerinden ibaret değildir.

Maden yatağının jeokimyasal yapısı, işletmeyle teması olan suların asit karakter kazanıp kazanmaması bakımından önemlidir. Çünkü söz konusu suların, mevcut minerallerden çözünür niteliktekileri çözmesi, çözünen iyonların, bilhassa ortam pH'ındaki değişimle yeniden katı faza dönüşerek çökelmeleri (presipitasyon) sonucu ikincil minerallerin oluşması ve nihayet bunların bazılarının tekrar çözünüp çözeltilmeye geçmesi drenaj sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerini tayin eder.

Öte yandan, mikroorganizmalar (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* vs), üremelerini ve başka hayati işlevlerini devam ettirebilmek için enerji kaynağına, yeni hücre sentezinde karbona ve diğer bazı elementlere ihtiyaç duyarlar. İndirgenmiş demir ve oksijenin eş zamanlı varlığı, bunları oksitleyen asitsever (acidophilic) bakterilerin gelişip büyümesine katkı yapar. Fe^{2+} 'in abiyotik şartlarda ve katalizör olmaksızın oksitlenmesi yavaştır. Ayrıca pH 3,5-3,0 aralığına indiğinde de durur. Ancak o seviyeye değin, pirit

oksidlendiğinde tepkime ürünü olan proton, sülfat ve Fe^{2+} 'in sudaki konsantrasyonları yükselir. Mikroorganizmalar enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla Fe^{2+} 'i oksitlerken, tepkime hızını büyük ölçüde artırarak süreci de etkilemiş olurlar.

Yığınlarda, özellikle derinliğe doğru fizikokimyasal mekanizma devreye girer. Burada, piritin oksitlenmesi yüzeyden başlayarak içeriye doğru ilerler ve egzotermik bir tepkime olduğundan ısı açığa çıkarır. Ortam sıcaklığı $70^{\circ}C$ 'a kadar yükselebilir. Artan sıcaklık gaz akışına neden olarak yığın içi oksijen transferinin işleyişini değiştirir. Hava geçirgenliği yeterli ise sıcaklık ve yoğunlukla yönlenen gaz konveksiyonu başlar (Lefebvre ve diğerleri, 2001). Bu girişimle sağlanan oksijen transferi difüzyondan daha etkindir. Bunun yanı sıra, sıcaklık değişimi mikroorganizmaların faaliyetlerini de etkileyebilir.

SAHANIN TANIMLANMASI VE KESTİRİM

Sahanın tanımlanması

Morin ve Hutt (1997) tarafından yapılan bir değerlendirmede, "Maden alanı bileşenleri birbirleriyle ve aynı şekilde çevreyle etkileşim içindedir... Teknik anlamda izole sınırları bulunmayan açık sistemlerdir. O nedenle, bu sistemler, tüm ortam ve onun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri doğru bir şekilde bilinmediği takdirde, tanımlanamaz ve gelecekteki davranışları önceden tahmin edilemez." denilmektedir. Dolayısıyla, sahanın AMD üretimine saptanabilmesi için, öncelikle yakın çevresiyle birlikte maden alanının jeolojisine, mineralojisine, üretim-zenginleştirme uygulamalarına, hidrolojisine, topoğrafyasına ve iklimine ait veri tabanı oluşturulması gerekir.

Esasında, maden yatağının bulunmasından önce yapılan temel jeolojik araştırmalar, arama aşamasındaki jeokimyasal tetkikler, etüt çalışmaları ve ÇED dönemindeki incelemeler istenen verilerin tamamına yakını kapsar. AMD açısından sahanın davranışının önceden kestirimine ilişkin veriler; katı numunelerde fiziksel/jeoteknik, kimyasal ve mineralojik, sıvı numunelerde kimyasal, fizikokimyasal ve bakteriyolojik analiz ve testlerle elde edilir. Mevcut veri eksiklikleri de bunlarla giderilerek kestirim sürecine geçilir.

Kestirim çalışmaları

Kestirim; bir maden sahasının AMD potansiyeline sahip olup olmadığının, varsa büyüklüğünün, sürekliliğinin, metal salım durumunun ve uzun dönem etkilerinin değerlendirilmesini içerir.

Kestirim için kullanılmakta olan yöntemler arasında jeokimyasal statik ve jeokimyasal dinamik (kinetik) testler, jeokimyasal modellemeler, özütleme (leaching) testleri, jeostatistiksel modellemeler (3D modelleme), saha ve laboratuvar çalışmalarıyla sağlanan verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması sayılabilir.

Standard asit-baz hesabı, pH6, net asit üretme, doymuş çamur pH'ı gibi çok sayıda statik test mevcuttur. Bunlar, temsili numunelerin azami asit üretme ve nötürleştirme potansiyellerini kısmen hesaplama, kısmen de test ederek belirlemeyi, sonuçta da bulunan değerleri kıyaslayarak asit oluşma ihtimalini tayin etmeyi hedefleyen öngörü yöntemleridir. Kestirim çalışmalarının başlangıcında başvuru; uygulaması görece kolay, kısa süreli, düşük maliyetli ve izleyen kademelere yön veren eleme niteliğindeki testlerdir. Asit üretme potansiyeli, numunenin mineralojik yapısında yer alan sülfürlü mineraller dikkate alınarak genellikle hesaplama yoluyla bulunurken, nötürleştirme potansiyeli, seçilen yöntemle göre az çok değişkenlik arz eden basit testlerle deneysel olarak tespit edilir.

Statik testlerin peşinden, gerekli görüldüğünde, başvuru jeokimyasal kinetik testler, temelde doğada gerçekleşen süreçlerin, olabildiği ölçüde, benzeştirme yoluyla laboratuvar koşullarına taşınmasıdır. Kinetik testlerde numuneler özütlenir, özütler (leachates) düzenli aralıklarla toplanır ve analiz edilir. Nem hücresi, kolon, çalkalama (shake flask) gibi farklı yöntemler içeren kinetik testler kimyasal, fiziksel ve biyolojik sistemler ve süreçleri birleştirirken, tepkime kinetiklerini, hızlarını ve mekanizmalarını çözümlenmeyi amaçlar.

Statik testlerdeki belirsizliklerin, uzun süren kinetik testlerdeki zaman kaybının ve maliyetlerin azaltılması için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Tüm modellerde, atık veya yığınlarından oluşan jeokimyasal sistem içindeki bir ya da daha çok değişkenin davranışı zamanının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaya çalışılır. Modelleri ampirik ve deterministik adı verilen iki gruba ayırmak mümkündür. Ampirik olanlar gözleme dayalı davranış eğilimlerinin, deterministik modeller drenajın niteliğini belirlediği düşünülen kimyasal ve fiziksel süreçlerin zamana bağlı davranışları üzerine kuruludur. Ampirik modellerde, değişkenler için, laboratuvar ve saha verilerinden elde edilen değerlerin grafikleri çizilir. Ortaya çıkan eğri ya da doğrudan yararlanarak eğilim saptanıp, zamana bağlı değişim tahmin (ekstrapolasyon) edilir. Deterministik modellerde, değerlerin değişiminde belirlenen mekanizmalara göre benzeştirme yoluna gidilir.

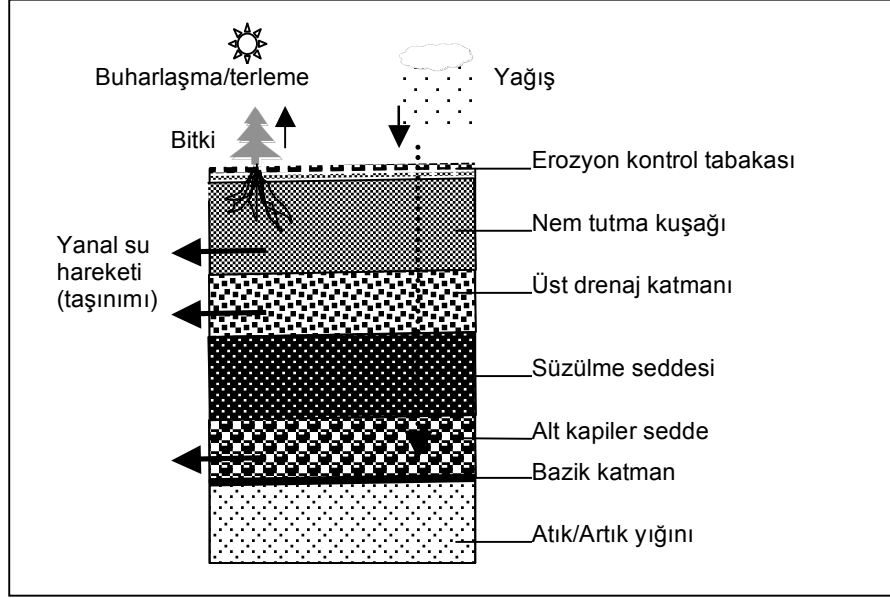
Geliştirilen kestirim yöntemlerinde amaç, en kısa zamanda, olabildiğince düşük maliyetle ve en güvenilir biçimde sahanın geleceğe dönük davranışını öngörerek, gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktır.

ÖNLEM YA DA ÇÖZÜM

AMD potansiyeline sahip bir madende atılacak ilk adım kaynakta önlemdir. Sürecin tetiklenebilmesi için üç temel bileşenin eşzamanlı bir araya gelmesi gerekir. O halde, üç unsurdan en az birinin izole edilmesi oluşumu engellemek bakımından yeterlidir.

1- Seçeneklerden biri su örtüsü uygulamasıdır. Sularda da oksijen bulunmasına karşın, ağırlıklı olarak çözülmüş halde olduğundan, oksitleme hızı ihmal edilebilir seviyededir. Ya artık malzeme yığını tamamen su altında kalacak şekilde su örtüsü oluşturulur, ya da malzeme deniz ve göl diplerine depolanır.

2- Oksijen ve su transferini engellemek gayesiyle yığının üzerinin kapatılması (toprak örtü) bir başka uygulamadır. Tek (basit), üç veya çok katlı (karmaşık) örtüler (Şekil 3) kullanılabilir.



Şekil 3- Çok katlı bir toprak örtü sisteminin şematik görünümü (Rasmuson, Eriksson, 1986'den değiştirilerek uyarlanmıştır).

3- Bir başka yaklaşım da malzemenin bazı işlemlere tabi tutulması veya tecrit edilmesidir. Bunlar arasında ayrıştırma, açık ocakta depolama, yeraltına depolama, harmanlama, tecrit (encapsulation), katkı maddeleri kullanımı ve yeraltı kontrolü gibi yöntemler sayılabilir.

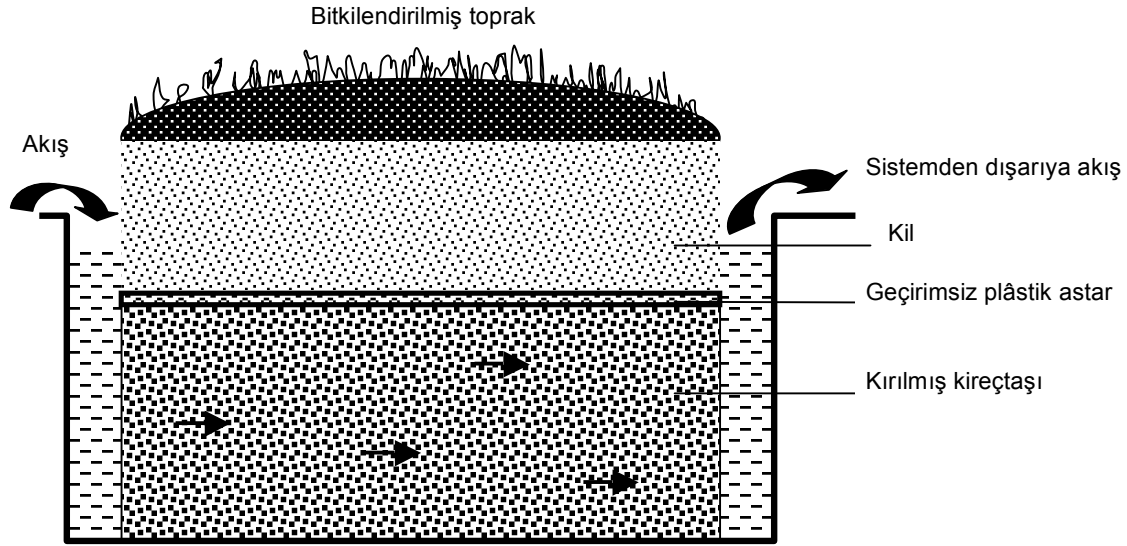
Rezervi biten veya terk edilen AMD potansiyeline sahip bir sülfürlü maden, gerekli önlemler alınmamışsa, muhtemelen kısa süre içinde asit üretmeye başlar. Bu gerçekleşmişse, artık kaynaktan önlem mümkün değildir. Yapılacak olan aktif arıtma tekniklerinden, ki genelde nötürleştirmedir, birine yönelmek ya da şartlar uygunsa son yıllarda gelişimi hızla ilerleyen pasif yöntemlerden birini tercih etmektir.

Nötürleştirme hidroksit veya karbonat bazlı bir kimyasal ilâvesiyle çözeltilerin asiditesini azaltıp, pH'ını yükseltmeyi hedefleyen yöntemlerdir.

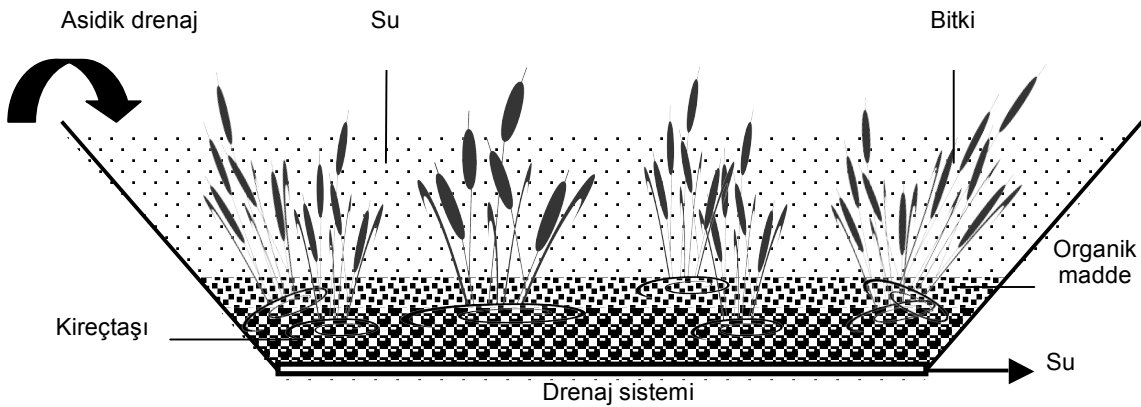
Pasif arıtma, doğada kendiliğinden gelişen ve olumsuz etkileri azaltan süreçlerin, mühendislik uygulamalarıyla alıcı ortamlar yerine arıtma sistemleri içinde ve suni biçimde, ancak çok daha hızlı gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu doğrultuda, ilk düşünülen sistem doğal bataklıklardan yararlanmak olmuş, ardından suni bataklıklar geliştirilmiştir. Suni bataklıklar haricinde, işleyişi tamamen kimyasal mekanizmalara dayalı abiyotik yöntemler de uygulamaya girmiştir. Gömülü kireçtaşı hücrelerinden, çözülmüş oksijen içermeyen drenaj suyu geçirilerek arıtma yapılan, bu esnada kireçtaşının çözünmesiyle ortama bikarbonat iyonu salan Anoksik Kireçtaşı Drenleri (Anoxic Limestone Drains) (Şekil 4), inşa edilen kanallar ve yarmaların tabanına kireçtaşı serilip, içinden drenajın geçirildiği Açık Kireçtaşı Kanalları (Open Limestone Drains) ve havuz dibine kireçtaşı yerleştirilip, drenaj suyunun

aşağıdan yukarıya, bir anlamda tersine akıtıldığı Kireçtaşı Havuzları (Limestone Ponds) diğer abiyotik sistemlerdir. Bazen birden fazla yöntem bir sistem içinde birleştirilerek uygulanabilmektedir. En üstte su, altında organik malzeme, onun altında kireçtaşının ve tabanda bir drenaj tesisatının yer aldığı, çoğunlukla bitkilendirilerek desteklenen Ardışık Alkalinite Üretim Sistemleri (Successive Alkalinity Producing Systems) başvurulan birleştirilmiş (kombine) (Şekil 5) bir yöntemdir.

Geleneksel aktif arıtma yöntemlerinin yüksek maliyeti, uzun süren mesuliyeti, devamlı bakım ihtiyacı ve malzeme tedariki, pasif sistemlerin, henüz uygulamada kimi kısıtlılıkları olsa da, gelecekte ağırlık kazanacağını göstermektedir.



Şekil 4- Bir Anoksik Kireçtaşı Dreninin şematik görünümü



Şekil 5- Bir ardışık alkali üretim sisteminin şematik görünümü.

SONUÇ

Madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan su kirliliğinde dikkatler, yakın geçmişe kadar siyanür üzerinde iken, bu giderek AMD'na yönelmektedir. Fakat yeterli düzeyde bilinmemesi bazı algı yanlışlıklarına sebep olmaktadır. Bir maden yatağında sülfürlerin, özellikle demir sülfürlerin bulunması, orada mutlaka AMD sorunu çıkacağı anlamı taşımaz. Aynı şekilde, karbonatların ve silikatların varlığı da “kesin olarak engelleyici unsurdur” denemez. Belirleyici olan, etkin faktörlerin yerel anlamda nasıl rol oynayacaklarıdır.

AMD hâlihazırda başlamışsa kaynağında önlenmesi söz konusu değildir. Bilhassa, çevresel duyarlılığın etkin olmasından önce işletilmeye başlayan ve kapatılan madenlerde gözlemlenen bu sorun, geliştirilen aktif ve pasif yöntemlerle, kimi zaman yüksek maliyetli de olsa, üstesinden gelinebilmektedir.

Çevre bilincinin gelişmesiyle, ÇED süreci devreye girmiştir. Çevresel plânlaması yapılan yerlerde, kestirim sonucunda AMD potansiyelinin var olduğu saptanmışsa, sorun ortaya çıkmadan çok daha düşük maliyet ve güvenle önlenebilmektedir.

Asıl mesele, gerekli çalışmanın zamanında yapılması, önlemlerin uygulamaya konması ve mutlaka denetlenmesidir.

DEĞİNİLEN BELGELER

Atabey, E. 2010. Türkiye’de İnsan Kaynaklı (antropojenik) unsurlar ve çevresel etkileri MTA Yerbilimleri ve Kültür Serisi-7 Ankara.

British Columbia AMD Task Force, 1989; “Draft Acid Rock Drainage Technical Guide”, S. Robertson and Kirsten Inc., Vancouver, British Columbia, Canada, August.

Environment Australia, 1997; Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage, Best Practice Environmental Management in Mining Booklet Series.

Environmental Protection Agency-EPA (US), 1994; Technical Document - Acid Mine Drainage Prediction.

Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J., ve Gelinis, P., 2001; “Multiphase Transfer Processes in Waste Rock Piles Producing Acid Mine Drainage 1: Conceptual Model and System Characterization”, Journal of Contaminant Hydrology, 52: pp.137-164.

Morin, K.A., ve N.M. Hutt., 1997; *Environmental Geochemistry of Minesite Drainage: Practical Theory and Case Studies*, MDAG Publishing, Vancouver, Canada.

Paktunç, A.D., 1998; “Characterization of Mine Wastes for Prediction of Acid Mine Drainage”, Environmental Impacts of Mining Activities, Azcue, J.M.,(Ed). pp.19-40.

Rasmuson, A. ve Eriksson, J. C., 1986; “Capillary Barriers in Covers for Mine Tailings Dumps”, Report 3307, The National Swedish Environmental Protection Board.