

ÇEVRESEL BİR MADENCİLİK SORUNU ASİT MADEN DRENAJİ VE BİR ÖRNEK: MATSUO NÖTÜRLEŞTİRME TESİSİ

“ Ekonomik faaliyetler mi, çevre mi, sanayi mi veya doğa mı?” açmazını aydınlatan “sürdürülebilir kalkınma” kavramının gelişmesi ve sınırlı ölçüde de olsa uygulanmasıyla birlikte, tüm ekonomik hareketler için, bütünüyle bir çevresel plânlama gereği doğmuştur. Başlangıçta madencilğe ağırlıklı olarak kentsel alanlara odaklanıldığı için, kırsal bölgelerde nispeten yumuşak kalan çevresel baskıların karşı konmaz rüzgarı, neticede madenciliği de sarmış ve aynı yöne doğru sürüklemiştir.

İnsanoğlunun ilk ekonomik faaliyetleri arasında yer alan madencilik, arama aşamasından izabe aşamasına kadar diğer tüm sektörlerde olduğu gibi, doğada doğanın değiştirilmesine bağlı olarak belli etkiler yaratmaktadır. Bu etkiler bir yandan tahribat, diğer taraftan da kirlenme şeklindedir.

Antik dönemlerde taşın kullanılmaya başlanması, madenciliğin milâdi olduğuna göre, madencilik binlerce yıllık bir süreçtir denebilir. Başlangıcından itibaren, maden yataklarında tenör bakımından zengin zonlardan fakire ve yüzeyden derine doğru bir değişim aralıksız sürmektedir. Geçmişte işletilen yüksek tenörlü yatakların tükenmesi nedeniyle düşen cevher tenörleri bunun yanı sıra artan üretim miktarları, etkilenen hacimleri çok büyük boyutlara çıkarmıştır. ABD’de Utah Bingam’da bulunan Kennecot Bakır Madeni 3 km genişliğinde ve 800 m derinliğinde insanın hayal gücünü zorlayacak çapta bir açık işletmedir. Güney Afrika Cumhuriyeti’nde Johannesburg yakınlarındaki Western Deep Altın Madeni’nde ise, yeryü-



Doğal ortamda gerçekleştirilecek her faaliyetin, bu ortam üzerinde belli bir etki yaratacağı açıktır. Bu etkinin doğal yaşamın bir parçası olduğunu unutulmamalıdır. Ayrıca doğanın kendini rehabilite edebileceği tahribat sınırına dek, insanların yaptığı her eylem doğal hayatı felakete sürükleyen bir kaynak olarak değerlendirilmemelidir.
Madencilik de Doğada Olumsuz Etki Yaratır.

**Mehmet Karadeniz*
Semih Gürsu****

* MTA Genel Müdürlüğü MAT Dairesi

** MTA Genel Müdürlüğü MAT Dairesi Mineraloji-
Petrografi Koordinatörlüğü
sgursu@yahoo.com

zünden 3350 m'yi aşan bir derinlikte çalışılmaktadır. Böylesi boyutların yanı sıra, Bingham Canyon, Patahora ve Bouganville gibi, günlük üretimi yarım milyon tonu geçen bazı madenler de mevcuttur. Bu büyüklükler madencilik ile doğa arasında, üzerinde durmayı gerektiren bir etkileşimin olduğunun en açık göstergesidir.

İşletme öncesi yapılan çalışmalar genellikle küçük çaplı tahribatlar biçimindedir. Ayrıca, açılan yollar, inşa edilen tesisler ve maden alanındaki hazırlık kazıları tahribatın çapını ihmal edilemeyecek düzeye çıkarır. İşletme aşamasına geçildiğinde etkiler bir takım değişikliklere uğrar. Özellikle açık işletmeler, topoğrafyanın ve ekolojik dengenin çok ciddi ölçüde zarar görmesine sebep olur. Bunun ötesinde su, hava ve gürültü kirliliği ilk akla gelen olumsuz etkileridir. Yeraltı maden ocakları ise, terminolojide tasman adı verilen, yüzeyde çökme ve eğer mevcutsa bina ya da benzeri yapı hasarları şeklinde gözlenen sorunlara kaynaklık eder. Ayrıca, yeraltı su kirliliği de daima rastlanan etkiler arasındadır.

Asit Maden Drenajı Bir Su Kirliliği Sorunudur.

Madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan en ciddi problemlerden birinin, sülfürlü metalik mineraller içeren madenlerde görülen "asit maden drenajı" (acid mine drainage-AMD) olduğu genel kabul gören bir saptamadır. Örneğin, yapılan bir araştırmada, Kanada Quebec'de bulunan 107 adet kapatılmış maden işletmesinden 21'inin AMD nedeniyle tehlikeli atık alanı olarak sınıflandırıldığı belirtilir⁽¹⁾. Asit kaya drenajı (ARD - acid rock drainage) olarak da literatürde yer alan, asit maden drenajı, madencilik faaliyetlerinin başlamasıyla ortaya çıkmakta ve faaliyet sonrasında da yıllarca devam etmektedir.

Sülfürlü mineral içeren kömür, baz metal, uranyum ve değerli metal madenlerinde, sülfürlü minerallerin su ve hava ile teması sonucunda oksidasyona uğramasıyla nihai tepkime ürünü olarak sülfürik asit (H₂SO₄) meydana gelir. Oluşumun kaynağı kayaç yığınları, atık barajına terkedilen proses artıkları, pirit konsantresi stokları, açık ve kapalı maden ocaklarında yapılan kazılarla açılan ve sürekli yenilenen yüzeylerdir. Başlangıç adımı, bu tür yataklarda sık rastlanan ve tetikleyici rolü oynayan bir demir sülfür mineralinin (çoğunlukla pirit, bazen pirotin veya markasit) su ve hava (oksijen) etkisine maruz kalması gereklidir. Sonrasında, birçok metalik mineral (arsenopirit, bornit, kalkozin, kalkopirit, kovelit, galen, millerit, molibdenit, sfalerit) ve bazı mikroorganizmalar (thiobacillus thiooxidans, thiobacillus ferrooxidans, ferrobacillus ferrooxidans, ferrobacillus sulphooxidans, metallogenium, leptospirillum ve sulfolobus)⁽²⁾ AMD oluşumuna ve gelişimine katkı yapar.

Asit oluşumunu başlatan üç temel unsur bulunur. Bunlar: nem (su), oksijen (hava) ve sülfürlü minerallerdir. Bunların dışında, bölgesel (iklim, hidrojeoloji), jeolojik, mineralojik (minerallerin türü, kristal yapıları, tane şekilleri, tane boyutları ve tenörleri), biyolojik, fiziksel ve kimyasal faktörler, prosese geliştirici veya engelleyici yönde etki eder. Bu bağlamda, asit oluşumu kimyasal, fiziksel ve biyolojik süreçlerin bir ürünüdür. Kısacası, karmaşık ve çok kademeli prosesler dizisidir⁽³⁾.

Ortamdaki bazı sülfürlü mineraller asit üretim potansiyeli taşıırken, karbonatlı ve silikatlı mineraller de asitlik artınca çözünmekte, tampon veya nötürleştirme etkisi yapmaktadır. Sülfürik asit oluşumu baskın olduğunda, ortamdaki sular asidik karakter kazanır ve pH seviyesini düşürür. Asidik maden suları yüzey akıntıları, sızma ve süzülme yoluyla yerüstü ve yeraltı su sistemlerine karışır. Su sistemlerinin hareketliliği bir yandan konsantrasyonun azalmasına yardımcı olurken, diğer yandan

da kirlenmenin uzak alanlara yayılmalarına sebebiyet verir.

Drenaj sularının pH'ı, ortam koşullarına bağlı olarak drenaj sularının pH'ı, 2'ye kadar düşebilmektedir. ABD'de Güney İllinois'da Shawnee National Forest'ta bulunan kömür madeni kaynaklı akıntıların pH'nın 2.3 ve Idaho Kellogg'daki Bunker Hill Madeninden kaynaklanan drenaj sularının pH 2.2 olduğu belirlenmiştir⁽⁶⁾. Bunun dışında, pH'ın düşmesi sonucu ortaya çıkan asidik koşullar altında genel anlamda metallerin çözünürlüğü artmaktadır. Artan çözünmeyle birlikte metal konsantrasyonu yükselmekte, suda bulunan çözünmüş katı oranı artmakta, organik madde eksikliği ortaya çıkmakta ve ardından sedimentasyon süreci gelişmektedir.

AMD, özellikle nehir ve göllerin ekosistemleri üzerinde etkilidir. pH'ın düşmesi yaşamlarını sularda sürdüren canlılar için başlı başına bir problemdir. Düşük pH (yüksek hidrojen iyonu konsantrasyonu) enzim sistemlerini etkiler. Bitkilerin solunumunu ve köklerin mineral tuzları ile suyu almasını güçleştirir. Suyun pH'ının 3'ün altına inmesi halinde hiçbir balık türünün yaşaması mümkün değildir.

AMD kaynaklı tek olumsuz etken pH değildir. Ayrıca metallerin asidik ortamda çözünürlükleriyle toksiteleri artar. Metaller çözüldüklerinde çok düşük miktarlar da olsa bile bitkiler ve diğer canlılar için toksiktir. Büyümelerini geciktirir veya tamamen durdurur. Kısacası, AMD bazı bitki ve hayvan türlerini yok edip, besin zincirinin basitleşmesine, hatta yıkılmasına sebep olabilir. Sudaki yaşamı tamamen ortadan kaldırabilir⁽⁶⁾. Özetle, AMD çevresel açıdan tam bir sorun yumağıdır.

Sorunu Tanımlamak

Bir probleme çözüm bulunabilmesinin ilk adımı onun her açıdan tam anlamıyla tanımlanmasıdır. Ancak takip eden aşamada, doğuracağı sonuçlar öngörülüp, en uygun çözüm bulunabilir.

AMD'ı bağlamında sorunun tanımlanması,

asit oluşumuna kaynaklık eden yığınlardan ve akıntılardan alınan temsili katı ve sıvı numunelerin niteliklerinin eksiksiz belirlenmesi ile başlar. Bu süreç, katı numunelerin kimyasal ve mineralojik analizleriyle, onların fiziksel ve jeoteknik karakterlerinin tayinini, sıvı ve katı numunelerde demir ve sülfürleri oksitleyen bakterilerin mevcudiyetini ve miktarını tespit etmek için bakteriyolojik incelemeleri kapsar.

AMD'nin oluşumu esnasında bir şekilde rol oynayan faktörlere ilişkin verilerin elde edilmesinden sonra, drenaj potansiyelinin hangi boyutta ve drenaj çözültüsünün niteliklerinin nasıl olabileceği konusunda geleceğe dönük kestirim yapabilmek mümkündür.

Bu kestirim AMD potansiyelinin büyüklüğünün, sürekliliğinin, drenaj kalitesinin ve uzun dönem etkilerinin değerlendirilmesini içerir. Kestirim için kullanılmakta olan yöntemler arasında statik ve kinetik testler, jeokimyasal modelleme, liç (özütme) testleri, jeostatiksel modelleme (3D modelleme), saha ve laboratuvar çalışmalarıyla sağlanan verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması sayılabilir⁽⁶⁾. Ayrıca, benzer özellikler gösteren başka maden alanlarındaki artık malzeme ile ilgili edinilen veriler de çalışmalara katkı sağlayabilir. Ancak, bu yöntemler arasında kullanımı en yaygın olanlar, statik ve kinetik test metodlarıdır. Son yıllarda, matematiksel modellemeler alternatif olarak düşünülmekte ve dikkate değer gelişmeler göstermektedir.

Çözüm Ne?

Sorunun net bir şekilde tanımlanması çözüm için tartışmasız ilk adımdır. Bir problemin üstesinden gelebilmenin tercih edilen yolu ise, genellikle onun hiç meydana gelmemiş olmasıdır. Eğer yapılan kestirim çalışmaları ile elde edilen veriler, asit üretim potansiyeli açısından, "gelecekte oluşma ihtimali yok" diyorsa, zaten uğraşacak bir mesele de yoktur. Ama, risk söz konusu ise, en iyi çare oluşumu engellemektir. AMD'nin oluşabil-

mesi için, hatırlanacağı üzere, sülfürlü bir metalik mineralin su ve oksijen ile aynı ortamda bulunması gerekir. Üç kritik unsurun bir araya gelip reaksiyon sürecini başlatmalarına mani olunması, sorunun henüz başlamadan bitirilmesi demektir. Bu yöntem, hem maliyeti düşük, hem de diğerlerine kıyasla daha etkin olanıdır. Uygun madencilik metodu seçilmesi, madenin izolasyonu (oksijen ile teması kesmek için sızdırmazlık sağlanması), alkali ilavesi, madenin suyla doldurulması, suyla temasın engellenmesi amacıyla yüzey sularının saptırılması, yüzey reklamasyonu ve yer altı suyu akış sistemlerinin kontrolü de başlıca tekniklerdir. Asit oluşumu kaçınılmaz olduğu durumlarda problemin boyutlarını küçültme yoluna gidilmelidir. Bu amaçla, proses sularını tekrar kullanarak atık su hacmini azaltmak, derin kuyu enjeksiyonu yapmak, yüzey altı barajları inşa etmek ve asit maden drenajını seyreltmek gibi önlemler başvurulabilecek başlıca yöntemlerdir.

Kaynakta önleme mümkün olamamışsa, aktif ya da pasif arıtma sistemlerinden birine başvurulması gerekecektir. Uzun yıllardır çözüm konusunda yoğun çabalar sarf edilen AMD sorununun halledilmesine yönelik geliştirilmiş sayısız yöntem mevcuttur. Ne yazık ki, maden yataklarının mineralojik yapılarının kendine özgü olmaları ve yerel koşullar nedeniyle çözüm yöntemlerinin tüm yataklara uygulanabilirliği söz konusu değildir.

Aktif arıtma öteden beri uygulanan ve drenaja bazik katkı maddeleri ilave edilmesi temeline dayanan tekniklerden ibarettir. Uygulamada en yaygın olanı kireç, kireçtaşı, hidrate kireç ve dolomitik kireçle ortam pH'ının düzenlenmesidir (nötürleştirme). Kireç bazlı katkı maddeleri dışında kostik soda, soda külü, magnezyum oksit ve magnezyum hidroksit de zaman zaman nötürleştirici olarak kullanılmaktadır. Arıtma teknikleri sadece

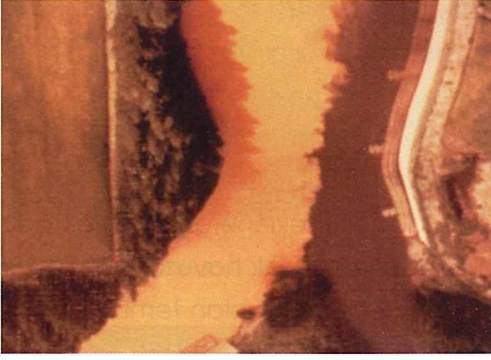
pH'a dönük olmayıp, çözeltide bulunan ağır metallerin uzaklaştırılması amacıyla sülfat uzaklaştırma, mikrobiyolojik arıtma, iyon değiştirme, elektrodializ, buharlaştırma, köpük flotasyonu ve ters ozmoz gibi çok çeşitli yöntemler tatbik edilmektedir⁽⁷⁾. Havalandırma (aeration), radyasyon, flaş distilasyon ve dondurma (freezing) uygulanmalarına rağmen daha az bilinen aktif yöntemlerdir.

Aktif sistemlerin yüksek maliyeti proses sonucu ortaya çıkan çamur hacmi ve uzun sürelerdeki işletme sıkıntıları araştırmacıları yeni arayışlara itmiş, bu sistemlere alternatif pasif sistemler geliştirilmiştir. Pasif arıtma sistemlerinde drenaj özel tasarlanmış suni bataklıktan geçirilip, içindeki kirleticiler uzaklaştırılmaktadır. Son yıllarda geliştirilen suni bataklık (wetlands) yöntemi başarılı sonuçlar vermekte olup giderek yaygınlaşmaktadır. Akış hızının ve çözelti asiditesinin nispeten düşük olduğu koşullarda aktif sistemlere alternatif olan pasif sistemler aerobik suni bataklıklar (constructed aerobic wetlands), anaerobik suni bataklıklar ve anoksik kireçtaşı drenleri (ALD - anoxic limestone drains) olmak üzere üç farklı tipte uygulanmaktadır. Basitlik, yüksek verim, sınırlı reaktif ihtiyacı ve düşük maliyet avantajlarına rağmen, halen bazı limitlerden dolayı, bir aktif sistem tekniği olan nötürleştirme ölçüsünde yaygın değildir.

AMD İçin Bir Japonya Uygulaması

Dünyanın en gelişmiş ülkelerinde biri olan Japonya'da madencilik faaliyetleri geçmişte de oldukça yoğun olmuştur. Özellikle sülfürlü cevherlerin ülkede yaygın olarak bulunması, üretimin tamamlanması sonrasında asit maden drenajının gelişmesi büyük çevre sorunlarına yol açmıştır. Özellikle Iwate bölgesinde sülfür madeni üretimi yapılan ve 1972 yılında terk edilen Matsuo Madeninde, üretimin tamamlanmasından sonra büyük miktarlarda

asit maden drenajı gelişmiş ve önlem alınmadığı için Akagawa nehrine karışan drenaj, büyük çapta çevre kirliliğine neden olmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Akagawa nehrine karışan ve büyük çapta çevre kirliliğine neden olan asit maden drenajı.

Nehrin kirlenmesiyle tarım alanları ve hayvan üretimi zarar görmüştür. Bölge hükümeti madenden kaynaklanan kirliliğin giderilmesi için önlemler almış, bölgede Matsuo Nötürleştirme Tesisi kurmuştur (Şekil 2).

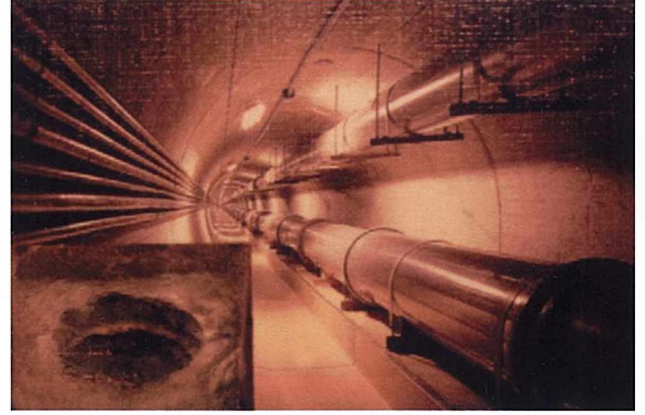


Şekil 2. Matsuo Nötürleştirme Tesisi, Iwate, Japonya.

pH değeri 2 olan ve doğrudan nehre bırakılan asidik su, bu tesiste nötürleştirme işlemine tabi tutularak pH değeri 4,14'e çıkarılmıştır. Böylece Akagawa nehri temizlenmiş ve çevre sorunlarına yol açan asit maden drenajı kaynaklı sorunlar büyük ölçüde giderilmiştir.

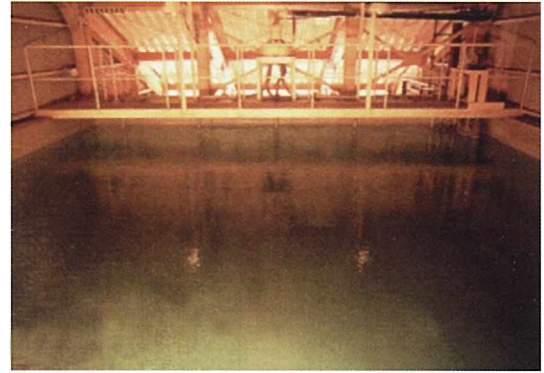
Matsuo madeninde çok sayıda galeri mevcuttur. Madencilik faaliyetleri esnasında drenaj 3 metre kotundan akarken, asit maden drenajını nispeten önlemek (oksidasyonu engellemek) için bu seviye betonlanmış, drenaj 112 metre se-

viyesinden verilmiştir. Bu işlem için günümüzde sabit drenaj kanalları kullanılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Sabit drenaj kanalları.

Sabit drenaj tünellerinden vinyl klorür borularla taşınan asit maden drenajı, dağıtıcı tanklara verilmektedir (Şekil 4). Asitik drenajda mevcut ferro demirin mikroorganizmalar yardımıyla okside edilerek üç değerlikli demire dönüştürülmesi işlemi oksidasyon tanklarında yapılmaktadır (Şekil 5).

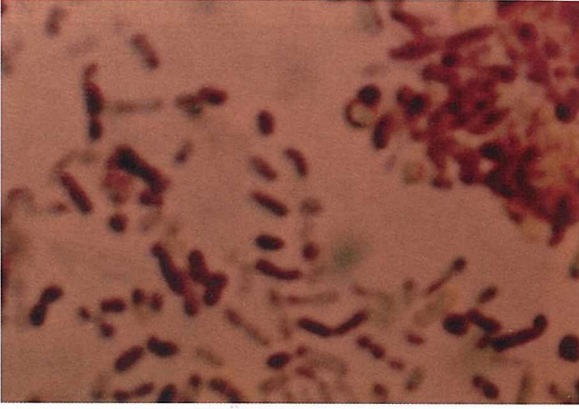


Şekil 4. Dağıtıcı tank.



Şekil 5. Oksidasyon tankı

Bu işlem sırasında bakteri olarak Thiobacillus Ferrooxidans kullanılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Oksidasyon tankında sürekli olarak iki değerlikli demiri üç değerlikli demire dönüştüren Thiobacillus Ferrooxidans bakterisi.

İki değerlikli demiri okside eden bakteriler, oldukça etkin sonuç vermekte ancak, oksidasyon tankında işlem sonucu Thiobacillus Ferrooxidans yoğunluğu artmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Thiobacillus Ferrooxidans bakterisinde, oksidasyon sonucu gelişen yoğunluk artışı.

Bakteri içeren demirli çamur, bakteri ayırma tankında yoğunlaştırılmakta ve pıhtılaştırılmaktadır.



Şekil 8. Bakteri ayırma tankı.

ci katkı maddeleri kullanılarak çöktürülmektedir (Şekil 8).

Bakteri konsantresi tekrar oksidasyon tankına iletilmektedir. Bakteri ile oksidasyon sonucu drenaj 325 mesh tane boyutunda CaCO₃ kullanılarak nötürleştirilmekte ve pH değeri 4.14'e yükseltilmektedir. Nötürleştirme esnasında ortaya çıkan temiz su ve sarı renkli sediment katı sıvı ayırma tanklarında pıhtılaştırıcı katkı maddeleri eklenerek ayrılmaktadır. Sarı renkli sedimentler atık havuzuna iletilirken (Şekil 9), pH değeri 4.14 olan temiz su Agakawa Nehrine verilmektedir.



Şekil 9. Nötürleştirme sonucu oluşan sarı renkli sedimentler atık havuzunda biriktirilir.

Aralıksız olarak 24 saat işletilmekte, yılda 9 milyon m³ asit maden drenajı bu tesiste arıtılmakta ve madenin çevreye verdiği olumsuz etki önlenmektedir. Çalışma sonucu pH değeri 4.14 olan temiz suda toplam demir 2.0 mg/lit, Al içeriği 57 mg/lit, arsenik içeriği ise 0.01 mg/lit değerlerine indirilmektedir.

Sürdürülebilir kalkınma için en önemli şartlardan biri olan madencilik sonrası çalışmalar, gelişmiş ülkeler tarafından başarıyla yürütülmektedir. Bu çalışmalardaki amaç, yüzey madenciliği sonucu ortaya çıkan pas ve artıkların su ile temaslarının kesilmesi, yüzeydeki taşmaların önlenmesi ve yüzey suyunda, asit maden drenajı gelişimini engellemektir. Kararlı bir yüzey haline gelen pasalardan ve yamaçlardan akan yüzey suları kanallar yapılarak ortamdaki uzaklaştırılmaktadır (Şekil 10).

Ayrıca madenin bulunduğu alandan ge-



Şekil 10. Maden alanında mevcut yamaçlardan akan yüzey suları kanallar yapılarak ortamdan uzaklaştırılmaktadır.



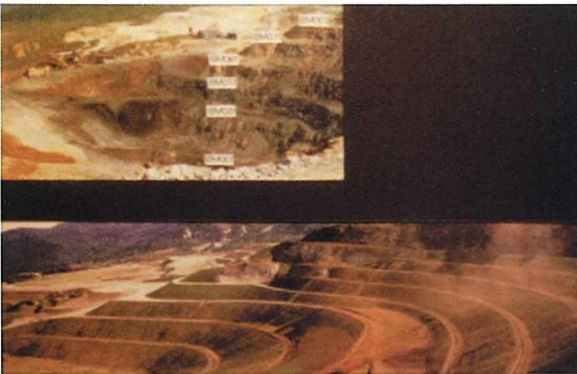
Şekil 13. Açık ocak işletmeciliği yapılan ocaklarda madencilik öncesi (a) ve sonrası yapılan iyileştirme çalışmalarına bir örnek (b).



Şekil 11. Madenin bulunduğu yüzeyden geçen küçük akarsu yatakları beton ile kaplanarak, yüzey suyunun yeraltına geçmesi önlenmektedir.

çen küçük akarsu yatakları beton ile kaplanarak, yüzey suyunun yeraltına geçmesi önlenmektedir (Şekil 11).

Büyük bir at nalı şekline sahip açık ocak işletmeleri, üretim sonrası düzenlenerek, basamaklardan akan sular kanallar yapılarak drene edilmekte, yüzey kararlı hale getirilmektedir. Yüzeyin toprak ve bitki örtüsü ile kaplanması sonucu rek-



Şekil 12. Açık ocak işletmeciliği yapılan ocaklarda madencilik öncesi (a) ve sonrası yapılan iyileştirme çalışmalarına bir örnek (b).

reasyon çalışmaları tamamlanmaktadır (Şekil 12a, b ve Şekil 13a, b).

Kaynaklar

- (1) Hossein, M., Hassanl, F. P., Leduc, R., 1993. A Brief Survey of Current Surface Waste Disposal Practices in the Metal Mining Industry. *Int. Journal of Surface Mining and Reclamation* 7, 23-28.
- (2) Kuyucak, N., 2000. Microorganisms, Biotechnology and Acid Rock Drainage-Emphasis on Passive-Biological Control and Treatment Methods. *Minerals&Metallurgical Processing* 17(2), 85-95.
- (3) Karadeniz, M., 2000. Asit Maden Drenajı. Cumhuriyetin 75. Yıldönümü Yerbilimleri ve Madencilik Kongresi, Ankara, 721-725.
- (4) Williams, R.E., 1975. Waste Production and Disposal in Mining-Milling-Metallurgical Industries. Miller Freeman Publication Inc., San Francisco.
- (5) Gray, N.F., 1997. Environmental Impact and Remediation of Acid Mine Drainage: A Management Problem. *Environmental Geology* 30 (1/2), 62-71.
- (6) Yörükoğlu, A. ve Karadeniz, M., 2003. Asit Maden Drenajı Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması. 18. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi (IMCET 2003), Antalya, 10-13 Ağustos 2003. G. Özbayoğlu (ed), TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Antalya, 125-131.
- (7) Karadeniz, M., 1996. Cevher Zenginleştirme Tesis Artıkları, Çevreye Etkileri, Önlemler. İstanbul Ofset Basım Yayın San. Tic. A. Ş., 332 s.