

# Madencilik Çevre Etkileri



Atık göleti barajının eteğinden sızan kırmızı renkli tipik asitli maden drenajı (pH=1-2; Fe=5000 ppm)

*Madencilik sektörünün en önemli çevre sorunları su, toprak, hava kirliliği ve bunun sonucu da bütün canlıların doğal yaşamının ciddi boyutlarda olumsuz etkilenmesidir. Bu nedenle, madencilikten elde edilecek ekonomik gelişme, doğuracağı çevre sorunlarıyla bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Bu konudaki çağdaş düşünce, ekonomik gelişmenin sürekli ve korunabilir olması yönünde olmalıdır.*

**Doğan Panktunc**  
Dr., Mining and Mineral Sciences Laboratories,  
Ontario, Kanada  
dpaktunc@nrc.ca

**M**adencilığe ilişkin çevre kirlenmesi maden işletme, cevher zenginleştirme, metal tasfiyesi ve kazanılması gibi işlemlerden dolayı ortaya çıkabilmektedir. Madencilğin çevre etkileri su kirlenmesi, toprak kirlenmesi, hava kirlenmesi, gürültü ve titreşim, ekosistemlere zarar ve çevre estetiğinin bozulması olarak özetlenebilir. Çevredeki metal konsantrasyonlarındaki artışlar maden ve metallurji endüstrilerinin karşı karşıya olduğu en önemli güncel sorunlardan birisidir. Sıvı atıklar, asitli maden drenajı, ince taneli atıklar, atık kayalar, toz ve gaz emisyonları maden çevrelerinde tehlikeli atıkların oluşumu ve birikimine neden olabildiği gibi bölgesel su ve toprak kirlenmesine de katkıda bulunabilmektedirler.

Cevhere ulaşmak için kazılan örtü tabakaları veya yan kayalar maden işletme alanlarında büyük hacimlerde yığınların birikimine yol açabilmektedir. Bu atık kaya ve moloz yığınlarından itibaren de su ve toprak kirlenmesi oluşabilmektedir. Cevher zenginleştirme işlemlerinden itibaren oluşan ince taneli atıkların depolanması hem arazi kaybına neden olduğu gibi hem de uzun süreli kontrol gereksinimlerinden dolayı su ve toprak kirlenmesine yol açabilmektedir. Maden eritme ve metal tasfiye çalışmaları su ve toprak kirlenmesinin yanı sıra büyük ölçülerde hava kirlenmesine de yol açabilmektedir. Hava kirlenmesi yüksek bacalar nedeniyle yöresel olmaktan çıkıp, uzun mesafeli kıtasal boyutlarda atmosferik kirlenmeye yol açabilmektedir. Eritilen metal ve bileşiklerinin sanayide ve günlük yaşamda kullanılması ve bunu takiben atılması ile çöp alanları da kirlenebilmektedir. Bunlara ek olarak sondaj çalışmaları, arama galerileri ve bunun gibi maden arama ve fizibilite çalışmaları da küçük ölçülerde yersel olarak su ve toprak kirlenmesine neden olabilmektedir. Bunların yanı sıra, çevre kirlenmesinin özellikle su kirlenmesi olarak yüze yakın maden yataklarından itibaren doğal olarak oluşabileceği de göz önüne alınmalıdır.

Madencilığe ilişkin en önemli çevre konuları arasında toprak ve su kaynaklarının ağır metallerce ve toksik elementlerce kirlenmesi ve ince taneli atıklar ve kaya yığınlarından itibaren oluşan asitli maden drenajı bulunmaktadır. Bu tip kirlenmeler, atık depoları veya yığınlarından itibaren oluşan sızıntılarca oluşabildiği gibi, atık göletleri için yapılan kaya/toprak dolgu barajlarının çökmesi sonucunda da

ortaya çıkabilmekte ve büyük ölçeklerde bölgesel kirlenme ve zarara neden olmaktadır. Bu durumda, atık barajlarının uzun dönemdeki jeoteknik stabilite ve ince atıkların sıvılaşma potansiyelleri önem kazanmaktadır. Örneğin, İspanya'da 1998 de Los Frailes çinko-kurşun-bakır madeninin atık barajının çökmesi sonucu yaklaşık 2000 hektarlık bir arazi 4 ile 5 milyon metreküp civarında asitli su ve ağır metal içeren ince taneli katı atıklarca kirlenmiştir. Benzer şekilde, 1995'de Guyana'daki Omai altın madeninin atık barajının çökmesi sonucu litrede 25-30 miligram siyanür içeren sıvı atıklar Omai nehrini kirlenmiştir.

### Ağır Metaller ve Toksik Elementler

Madencilik operasyonlarından çevreye yayılabilen ve çevreye zarar verici olarak nitelenmiş metaller arasında Pb, Cd, Cr, As, Hg, Cu, Zn, Ni ve Fe bulunmaktadır. Bu metaller maden atıklarında mineral bünyesinde ana element olarak ( $ZnS$ ,  $PbCO_3$ ,  $FeS_2$ ); mineral bünyesinde minör veya iz elementler olarak (Sb in  $PbS$ ); hidroksit bileşiklerine bağlı olarak (demir hidroksitlere bağlı As); mineral yüzeylerinde çözünür bileşikler halinde sulu veya kompleks iyonlar oluşturarak bulunabilmektedir.

Her bir durumun çevre etkisi metallerin su ve toprak ortamlarından biyolojik olarak alımın yatkınlıklarına bağlı olarak oldukça farklı olabilmektedir. Çözünür bileşikler halinde bulunan metaller organizmalarca kolayca alınabilmektedir. Kil minerallerinin ve sulu hidroksitlerin yüzeylerinde yapışık bir şekilde bulunan metallerin mineral kristal yapılarında bulunan metallere kıyasla bitkilerce alımı daha kolay olmaktadır. Mineral/kristal yapılarında bulunan metallerin çevreye yapabilecekleri olumsuz etkiler, içerisinde buldukları mineral veya bileşiğin çevre koşullarında ki duraylılığına dayanmaktadır. Bu nedenlerle, metallerin ne şekilde buldukları yani mineralojik bileşimlerinin saptanması çevre kirlenmesinin boyutları ve etkilerinin

değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir metalin çevrede yüksek konsantrasyonlarda bulunması o metalin çevreye zararlı olduğu anlamına gelmemelidir. Bu nedenle metal konsantrasyonlarının kimyasal yöntemlerle çevrede varlıklarının tayini yetersiz olmakta ve mineralojik ve kimyasal bileşimlerinin saptanması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, metallerin atıklar içerisindeki mineralojik ve kimyasal bileşimleri ve metallerin ne dereceye kadar bitkiler ve organizmalarca bünyelerine alınabilecekleri ve dolayısıyla toksiklik derecelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

### Siyanürlü Atıklar

Siyanürle altın üretimi basit, etkili ve ekonomik olmasından dolayı altın madenciliği endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Yaklaşık 100 yıldır kullanılan siyanürle altın çıkarım teknikleri, seyreltilmiş siyanür çözeltileri kullanılmaktadır. Liç çözeltileri litrede 1 gram civarında NaCN veya KCN içermektedir. Siyanürle altın ayırımı tonda 1-2 gramdan fazla altın içeren cevherlere uygulanabilmektedir. Her ton cevher için 0.25 ile 2 kg arasında değişen miktarlarda NaCN veya KCN oluşmaktadır. Siyanür çevreye ve insan sağlığına zararlıdır. Bu nedenle de kullanım, depolama ve atımları için ciddi ve uygun tedbirlerin alınması gerekmektedir. Liçleme sonu siyanürün çoğu serbest olarak, metal siyanür kompleksleri şeklinde ve reaksiyon ürünleri olarak sıvı atıklar içerisinde kalmaktadır. Bu atıkların siyanürden arındırılmaları yaygın olarak kullanılan teknikler, doğal azalım, INCO  $SO_2$ /hava prosesi, hidrojen peroksit tekniği, sınırlı kullanımı olan teknikler, alkali klörlüme tekniği, biyolojik arıtım, siyanürün tekrardan kazanılması teknikleriyle gerçekleştirilmektedir. Atıkların siyanürden doğal yollarla arıtılması tekniği en yaygın olarak kullanılan tekniklerden birisidir. Buna göre, metal siyanür kompleksleri önce dissosiyasyon olmakta ve siyanür HCN şeklinde uçmaktadır. Bu teknik pH, sıcaklık, ultraviyole radyasyon ve havalandırma koşullarına bağlı olarak siyanürün yok edilmesinde etkili olabilmektedir. Havalandırma ve güneş ışınları etkilerinin artırılması atıkların geniş alanlarda depolanmaları gereksinimini doğurmaktadır.

Atıkların uzun süreli depolanması sızıntı ile yeraltı suyu kirlenmesi olasılığını arttırmaktadır. Buna ek olarak kuş, ördek vb. hayvanların atık göletlerinden zehirlenme olasılıklarını doğurmaktadır. Metal siyanür kompleksleri doğal koşullarda tam olarak dissosiyasyon olamamakta ve çok soğuk, karlı, buzlu hava koşullarında siyanür parçalanmamaktadır. INCO  $SO_2$ /hava ve hidrojen peroksit teknikleri doğal parçalanmaya takviye olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Siyanürleme işlemi sonucu atıktaki kalan siyanür INCO  $SO_2$ /hava prosesi ile kimyasal olarak yok edilebilmektedir. Altın üretiminde yaygın olarak kullanılan bu işlemde, atıklar sülfür dioksitli ve hava karışımı bir gaz ile temas ettirilmektedir. Önce siyanit (CN) siyanat (CNO) oksitlenmekte ve süreç sonunda siyanat çürüyerek



Siyanürün kimyasal yollarla parçalandığı tesis. Arıtılmış atık su arka planda görülen gölete aktarılmaktadır.

amonya ve karbon dioksit oluşturmaktadır. Oksitlenmede katalizör olarak kullanılan bakır aynı zamanda  $Fe(CN)_6^{4-}$  iyonlarını çözünürlüğü çok az  $Cu_2Fe(CN)_6$  'a çevirerek ortamdan ayırmaktadır.

### Asitli Maden Drenajı

Asitli maden drenajı (AMD), maden endüstrisinin karşı karşıya olduğu en büyük çevre problemlerinden birisi olarak nitelendirilmektedir. Maden şirketlerinin AMD'ye ilişkin finans yükümlülüklerinin 10 milyar doları geçtiği tahmin edilmektedir. Örneğin, Kanada'da toplam olarak 12,500 hektarlık bir arazi AMD oluşturabilecek nitelikteki ince taneli atıklarca kaplı bulunmaktadır. Bunun yanısıra, 750 milyon ton kadar AMD oluşturabilecek nitelikte atık kaya bulunmaktadır.

AMD pirit ve pirotin gibi sülfid minerallerinin oksitlenmesi sonucunda oluşan düşük pH'li (3'ün altında) bir drenajdır. AMD tipik olarak 800 ile 1800 mg/L civarlarında yüksek sülfat konsantrasyonları içermekte ve 50 mg/l'ye kadar Cu, 1000 mg/l'ye kadar Fe, 12 mg/l'ye kadar Pb ve 1700 mg/l'ye kadar Zn metallerini çözünmüş olarak içermektedir. Bunların yanısıra AMD yüksek thiosülfat ve siyanür konsantrasyonları da içerebilmektedir. AMD kaynakları atık kaya yığınları, ince taneli atık göletleri, açık ocak duvarları, yeraltı ocakları ve cevher stok yığınları olarak sıralanabilir.

Asitli drenaj karbonat ve silikat minerallerinin çözeltiliye geçmesiyle nötralize olabilmektedir. Karbonat mineralleri arasında kalsit ve dolomit gibi Fe içermeyen mineraller ve silikat mineralleri arasında çabuk çözünebilen Ca-plajiyoklaz ve Mg-olivin gibi mineraller en etkin nötralizasyon kapasitesilerine sahiptirler.

AMD oluşum faktörleri sülfid minerallerinin cinsi, miktarı, özellikleri ve dağılımları; asit nötralize kapasitesine sahip bazik minerallerin cinsi, miktarları, özellikleri ve dağılımları; atık kayaların cinsi, tane büyüklükleri, gözeneklilik, geçirimsizlik, sıkışma dereceleri, tanelerin dağılım özellikleri, atmosferik koşullar, yağış miktarı, sıcaklık, sahanın hidrojeolojik özellikleri, atık miktarları ve depolama operasyonları ve sülfid ve demir oksitleyen bakterilerin varlığı şeklinde sıralanabilir.



Asitli maden drenajı yol yarmalarından itibaren de oluşabilmekte ve kaya yüzeylerinde, açığa çıkan sülfid minerallerinin oksitlenmesiyle oluşan koyu sarı-kahverengi bir tabakanın varlığı ile belirlenebilmektedir (solda). Terkedilmiş bir maden sahasında atık kaya yığınları üzerinde oluşan asitli maden drenajı (sağda).

AMD düşük pH'in yanısıra içerdiği yüksek sülfat ve ağır element konsantrasyonlarından dolayı çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Asitli maden drenajı başladıktan sonra durdurulması oldukça güç olup, kontrolü pahalıdır. AMD sonucu yüzey ve yeraltı suları kirlenebilmekte ve kirlenen suların temizleme çalışmaları oldukça masraflı olmaktadır. Bunlardan dolayı, AMD'nin oluşumundan önce doğru olarak tahmini önem kazanmıştır. Atıkların tanımlanması ve AMD tahmini değişik laboratuvar ve saha testleri sonucunda jeokimyasal modelleme çalışmaları ile yapılmaktadır. Laboratuvar testleri kimyasal analizler, asit-baz sayım testleri, mineralojik analizler, nemlilik testleri ve tüp testleri olarak sıralanabilir. Saha testleri ise atıklar üzerinde yapılan ölçümler, varil testleri, saha test çukurları ve test yığınlarından ibaret olmaktadır. Bu çalışmaları takiben, toplanan bilgilerin değerlendirilmesi ve jeokimyasal modelleme çalışmaları ile asit maden drenajının oluşum olasılığı saptanabilmekte ve ne kadar bir süre sonra oluşacağı tahmin edilmektedir.

AMD oluşumu oksitlenme için gerekli oksijen miktarının azaltılması, oksitlenme ürünlerinin taşınması için gerekli suyun ortamdan uzaklaştırılması ve oksitlenmeyi hızlandıran bakterilerin varlığının sınırlanması ile önlenmektedir. Amaç nötr bir drenaj sağlamak olduğuna göre, sülfid minerallerine ulaşacak oksijen konsantrasyonunun en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu esas olarak atıkların üzerlerinin su ile veya geçirimsizliği az kil, toprak v.b. maddelerle örtülmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Açık basenlere atılan ince taneli atıklar barajlama ile su altında depolanabilmektedir. Kapalı havzalara atılan atıkların AMD kontrolü üzerinde belli bir derinlikte su seviyesinin sağlanması ile yapılabilmektedir. Açık işletme ocakları da işletme sonunda atıkların depolanabilmeleri için uygun bir ortam oluşturabilmektedir.

Deneyisel ve kurumsal araştırma sonuçları su örtüsünün uzun dönemde sülfid minerallerinin oksitlenmesinin önlenmesinde etkili bir engel olduğunu göstermektedir.





Açık işletme ocağının yamaçlarından itibaren oluşan ve ocak tabanında biriken asitli maden drenajı.

## Yönetmelikler ve Değerlendirme

Madencilikten elde edilecek ekonomik gelişme, doğuracağı çevre sorunlarıyla bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Bu konudaki çağdaş düşünce, ekonomik gelişmenin sürekli ve korunabilir olması yönündedir.

Ekonomik gelişim ve çevre kirlenmesi esas olarak birbirleriyle çelişki içerisinde. Ekonomik gelişme çevre etkisi olmaksızın gerçekleşmemektedir. Bu durumda önemli olan şey ekonomik gelişmenin bilinçli bir şekilde, ileriye yönelik çevre etkilerinin en aza indirgenerek, gelecek nesilleri düşünerek gerçekleştirilmesidir. Madencilik ve çevreyi ilgilendiren yönetmeliklerin geliştirilmesinde Kanada ve bir çok ülke benimsenen "sürdürülebilir kalkınma" olarak bilinen ekonomik gelişme ve çevrenin korunmasını dengeli bir şekilde yürütülmesi prensibi hakimdir. Sürdürülebilir kalkınma, 1986 yılında Brundtland komisyonunca şöyle tanımlanmıştır: Gelişmeler kuşakların şimdiki ihtiyaçlarını karşılamayı hedeflerken, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılayabilmesinde herhangi bir engel oluşturmamalıdır. Bunun yanı sıra madencilik ve çevresini etkileyen önemli kararlardan birisi de 1995 Basel toplantısında alınmıştır. Bu toplantı, zararlı atıkların gelişmiş ülkelere ihracını yasaklamaktadır. Bundaki amaç, şirketlerin kendi ülkelerindeki depolama ve atım işlemlerindeki yönetmeliklerin sıklığından ve masraflarından kaçarak atıkları çevre yönetmeliklerinin henüz gelişmediği ülkelere göndererek sorumluluklarından kurtulmalarını engellemektir. Bunlara ilaveten Kanada, diğer ülkelerde madencilik ve arama yapan Kanada şirketlerinden en azından Kanada'da uygulanan standartlara uymalarını beklemektedir.

## Önlemler

Madencilığe ilişkin çevre kirlenmesi işletme öncesi, esnası ve sonrası için planlanan ve etkili bir yönetim çerçevesinde yürütülen uygulama ve denetim ile önlenbilir veya en aza indirgenebilir. Bunun için gerekli çalışmalar ise şöyle özetlenebilir: Atıkların cins ve miktarlarının belirlenmesi, atık yığınları, gölet ve depolarının uzun süreli jeoteknik duraylılıklarının belirlenmesi, atıkların fiziksel ve jeokimyasal özelliklerinin saptanması, atıklardaki kirlenici element ve bileşiklerin uzun dönemdeki davranışları ve çevreye yapabilecekleri etkilerin tahmini, atıkların çevreye zarar vermeden uzun sürede saklanabilmesi için gerekli tedbirlerin belirlenmesi, kirlenmeyi önleyici tedbirler, kontrol ve arıtma sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması şeklinde özetlenebilir.

Metallerin çevredeki varlıkları madencilik faaliyetlerinden olabildiği gibi doğal olarak da olabilmektedir. Bu nedenle çevredeki metallerin doğal kaynaklardan oluşan katkılarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu, doğal kaynaklardan oluşan metallerin zararsız olduğu anlamına gelmemelidir, fakat konuların böyle bir çerçevede belirlenmesi mitigasyon çalışmaları için gerekli olmaktadır. Çevrede varlığı belirlenen metal miktarlarındaki artışlar, denetleyici kuruluşlarca zararsız olarak tanımlanan metal miktarlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Böylece çevredeki metallerin yüksekliği, bu tür taban sınırlarla karşılaştırılarak belirlenebilmektedir. Bu durumda taban seviyelerin doğru olarak saptanmaları oldukça önem kazanmakta ve seviyelerin bölge jeolojisi koşullarının göz önüne alınarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.