

ASİT MADEN SAHALARININ OLUŞUMU BAKTERİ-MİNERAL DOSTLUĞU ?

Asit Maden Sahaları (AMS) Bakteri- Mineral ilişkisinin en iyi örneklerini sergilerler. Gerekli fizikokimyasal koşullar (pH, Sıcaklık gibi) oluştuğunda oldukça uzun sürecek bu dostluk çevre açısından istenmeyen sonuçlar doğurmakta başarılıdır. Peki bu dostluk nasıl başlar?

Dr. Nurgül ÇELİK-BALCI

(İTÜ Maden Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü)
ncelik@itu.edu.tr

Dr. Yüksel ÖRGÜN

(İTÜ Maden Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü)

Dr. Nevin Gül KARAGÜLER

(İTÜ Moleküler Biyoloji-Biyoteknoloji
&Genetik Arş. Merkezi)

Yerküre dışında yaşam arama çabaları, bizlere şaşırtıcı bir dünyanın kapılarını açtı. Bildiğimiz yaşam sınırlarının pek de doğru olmadığını, daha da önemlisi çok sınırlı olduğunu öğrendik. Gelişen moleküler biyoloji teknikleri ile yaşamın çeşitliliğini ve sınırlarını artık daha iyi biliyoruz. Örneğin, *Acidithiobacillus concretivarus* bakterisinin keşfedilmesiyle, metalleri (Fe, Cu, Pb) çözecek kadar güçlü sülfürik asit içerisinde yaşayan; hatta başka yerde yaşayamayan organizmalar olduğunu öğrendik. *Micrococcus rapiophilus* denilen diğer bir bakteri türünün nükleer atıklarda, plütonyum gibi reaktif maddelerle karınlarını tıka basa doyurarak mutlu mesut yaşadığını keşfettik [1]. Kaynar çamur havzalarında ve sodalı göllerde, kayaların içinde, denizlerin dibinde ve Pasifik okyanusunun 11 km derinliklerinde yaşayan bakteriler bulundu (hatırlatmak isterim ki: O derinlikte basınçlar, yüzeyde olduğundan en az bin kat büyüktür; yani 50 jumbo jetin altında kalıp ezilme ile aynıdır!!) [1]. Şu ana kadar bildiğimiz yaşam mücadelesinin belki de en olağanüstü olanı, iki sene boyunca Ay'da dikili kalmış bir kameranın sızdırmaz merceğinde bulunan bir *streptococcus* bakterisininikidir.



Şekil 1. Okyanus dibinde bulunan simbiyotik ortamlar

Yerkürenin derinliklerinde yaşayan bir sürü mikroorganizma olduğunu artık biliyoruz. Bunların çoğunun, organik dünya ile hiçbir bağlantıları yok. Onlar, kayaları daha doğrusu kayaların içindeki Fe, S, Mn gibi elementleri yiyor. Fe, Cr, hatta U gibi elementleri ise soluyorlar. Buna en güzel örnek Asit Maden Sahalarıdır (AMS).

AMS nedir ve nasıl oluşur?

Yüzey ve/veya yeraltı madencilik işlemleri sırasında, sülfürlü cevher içerisinde dingin durumdaki kükürt, kaya parçalanıp ufalandığından atmosferik oksijen ve su ile tepkime olanağı bularak oksitlenmeye başlar. Bu oksidasyon sonucunda, yüksek sülfat, metal ve düşük pH'lı (<3) asit maden suları ve sahaları oluşur. Düşük pH'lı bu asidik sular kaya parçalarındaki ağır metalleri çözerek, yüzey ve yeraltı sularına karışmasına neden olur. Bu süreç doğal olarak da gelişmekte olup, madencilik faaliyetleri bu süreçlere katalizör etkisi yapar.

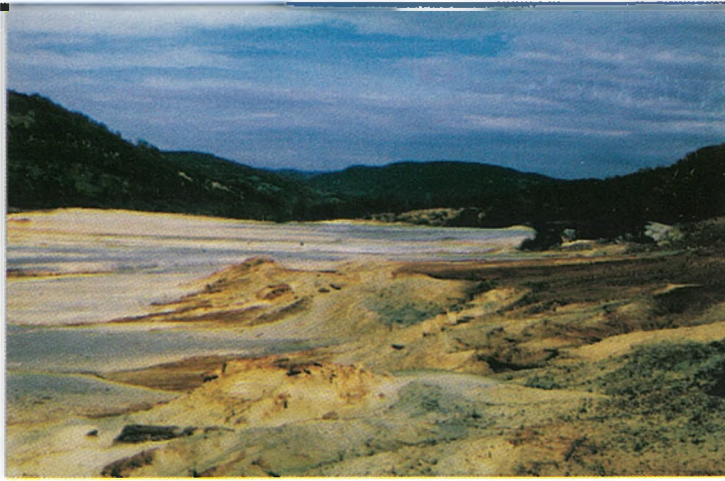
Asit maden sahalarının oluşumunda genellikle sülfür içeren minerallerin (galen, sfalerit ve vb.) etkisi olmasına rağmen, pirit bu tür sahaların oluşmasında birincil etkindir. Bu nedenle, yüksek Fe-sülfid (% 90 pirit) ve düşük karbonat mineral içerikli sülfid (VMS) yataklarının asit maden sahası oluşturma potansiyelleri oldukça yüksektir. Buna ek olarak, pirit içerikleri yüksek kömür sahaları AMS'nin en yaygın olduğu yerlerdir. AMS sahalarının, en karakteristik özelliği, Cu, Pb, Zn, Hg, As gibi toksik metaller açısından zengin olması ve

kırmızı, turuncu ya da sarı renkli Fe-oksit minerallerinin oluşması nedeni ile sahanın kırmızı bir renge bürünmesidir (Şekil 2, 3).

AMS'ri dünyada madencilığe bağlı olarak gelişen en yaygın çevre problemidir. Özellikle, yeraltı madencilığıne bağlı olarak açılan galeriler, havanın



Şekil 2. Asit maden sahalarından görüntüler [2].



Şekil 3. Balıkesir-Balya atık sahalarındaki AMS oluşumları

ve suyun yeraltına ulaşmasını kolaylaştırarak, pirit ve ortamdaki diğer sülfürlü cevher minerallerinin hızla oksitlenmesini sağlayarak, asidik sular oluşumuna neden olurlar.

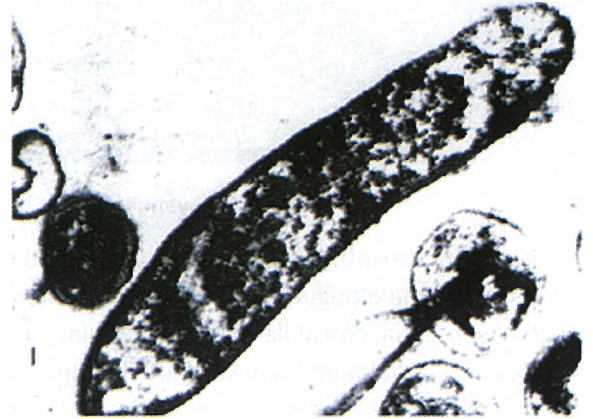
Bakterilerin Rolü Nedir ?

AMS'ları bakteri-mineral ilişkisinin en iyi örneklerini sergilerler. Gerekli fizikokimyasal koşullar (pH, sıcaklık gibi) oluştuğunda, oldukça uzun sürecek bu dostluk, çevre açısından istenmeyen sonuçlar doğurmakta oldukça başarılıdır. Peki bu dostluk nasıl başlar?

AMS'nın oluşumunda ana rolü oynayan Pirit reaksiyon 1'de gösterildiği gibi, atmosferik O₂ ile temas ederek, hem kimyasal hem de biyolojik olarak oksitlenir. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, bu tür

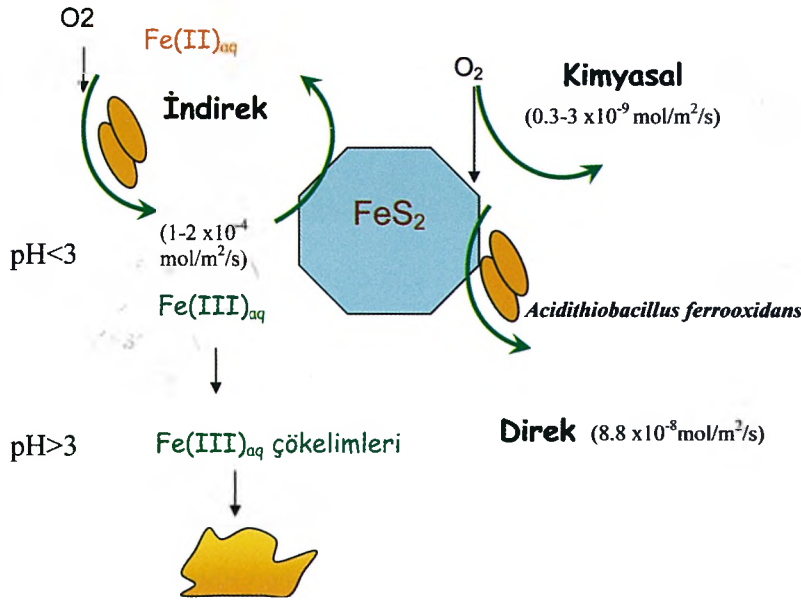
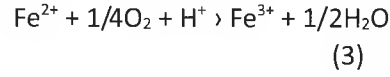
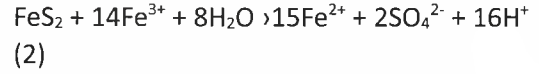
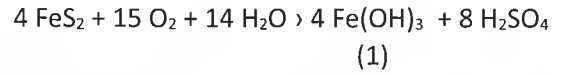
sahalarda yaygın olarak bulunan ve özellikle pirit olmak üzere sülfürlü mineralleri oksitleyen bakteri türüdür (Şekil 4). Bu bakteri, yaşamı için gerekli olan enerjiyi, pirit içerisindeki sülfür ve Fe(II)'yi oksitleyerek; yani piriti ayrıştırarak elde eder (reaksiyon 1 ve 3). Bu ayrışma, bakterinin pirit yüzeyine tutunması ile başlar. Yüzeğe tutunan bakteri ortamdaki O₂'i elektron alıcı, pirit içerisindeki kükürdü de elektron verici şeklinde kullanarak, piriti ayrıştırır ve kendini besler. Bu sırada, pirit yüzeyi ve bakteri arasında gelişen polimerik (EPS) madde elektron alış verişini

kolaylaştırarak, ayrışmayı son derece hızlı hale getirir. Bu tür pirit oksitlenmesine direk oksitlenme denir (reaksiyon 1).



Şekil 4. Elektron mikroskobu altında *A. ferrooxidans* bakterisinin görüntüsü [3].

Atmosferik O₂'nin yanı sıra, pirit Fe(III)_{aq} iyonu tarafından da oksitlenmektedir (reaksiyon 2) [4]. Atmosferik O₂'e oranla daha güçlü bir oksitleyici olan Fe(III)_{aq}'ün asit koşullar altında (pH <3) oluşumu, *A. ferrooxidans* bakterisi tarafından kontrol edilmektedir (reaksiyon 3). Oluşan Fe(III)_{aq} iyonu piriti kimyasal olarak reaksiyon 2'de gösterildiği gibi oksitler ve ürün olarak, sülfat, Fe(II)



Şekil 5. Piritin asit koşullar altında (pH<3) oksidasyon döngüsü [4].

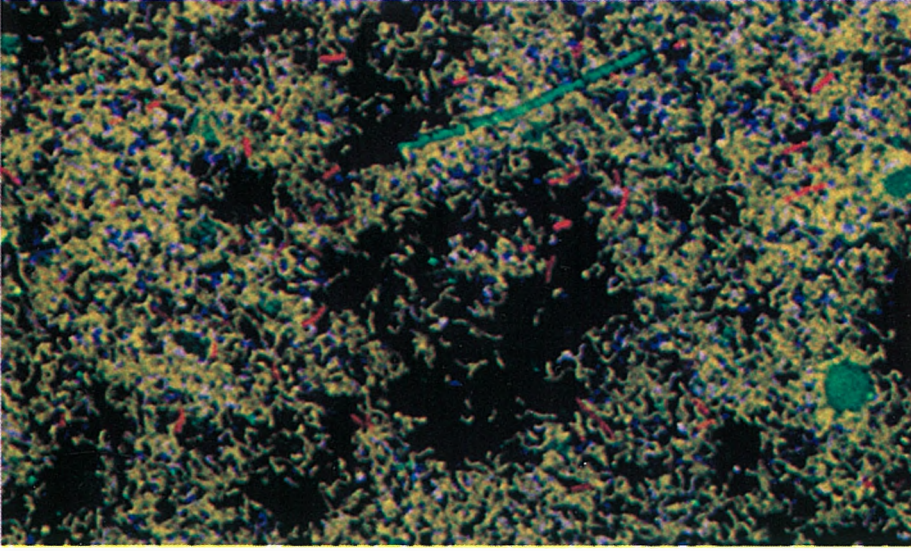
ve asit oluşur. Piritin bu oksidasyon şekli ise, bakterinin doğrudan piriti değil de oluşan Fe(II)'yi oksitleyerek, döngüye katılmasından dolayı indirek oksidasyon olarak adlandırılır (Şekil 5). Ortama katılan Fe(II) bakteri tarafından Fe(III)_{aq}'e tekrar oksitlenir ve böylece sıkı bir dostluğa neden olacak döngü başlar. Piritin direk ve indirek olarak oksitlenme oranları Şekil 5'de verilmiştir. Laboratuvar koşulları altında hesaplanan bu oksidasyon oranları piritin Fe(III)_{aq} iyonu tarafından, çok hızlı oksitlendiğini göstermektedir [4]. Oysa, piritin kimyasal olarak oksitlenmesi oldukça düşük oranda gerçekleşmektedir. Piritin bu oksidasyon döngüsünde bakterinin ana rolü, ortama Fe(III)_{aq} iyonu sağlamasıdır (Şekil 5). Bu çalışmalar, AMS'nin oluşumunun mikroorganizmalar tarafından kontrol edildiğini göstermiştir.

AMS'sı Sakinleri kimlerdir ?

Başlangıçta, maden atık sahalarının asidik ve besin açısından limitli bir ortam olması nedeniyle sınırlı ve az çeşitli bir mikroorganizma topluluğu bekleniyordu. Ancak, kültüre dayalı yapılan çalışmalar bu beklentinin hiçte doğru olmadığını aksine AMS'nin çok çeşitli mikroorganizmalara sahip olduğunu ortaya

koydu. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *A. caldus*, ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi prokaryotik kemolitotrofların yanı sıra, farklı bakteriyel türlerin varlığı da bu sahalarda ortaya kondu.

Sülfür ve Fe oksitleyen *Sulfurisphaera*, *Ferroplasma* ve *Acidianus*, *Metallosphaera* gibi arkeaların da bu çeşitlilik içinde yer aldığı belirlendi. Kısa zamanda, kültüre dayalı yapılan çalışmaların yeterli olmadığı belirlendi ve araştırmacılar AMS'ında ki mikrobiyal topluluğu araştırmak için 16S rDNA methodunu geliştirdiler [5, 6]. DNA izolasyonu, PCR, DGGE ve FISH (fluorescence in-situ hybridizations) gibi gelişen moleküler biyoloji teknikleri ile AMS'ında ki mikrobiyolojik toplulukları artık daha detaylı belirleyebiliyoruz. DNA izolasyonu ve dizi analizi çalışmaları AMS'ında kimler yaşıyor sorusuna cevap vermekle birlikte, organizmaların miktarı, metabolik aktiviteleri ve ekolojik topluluk içindeki yeri



Şekil 6. AMS'sında gelişen biofilmin FISH resmi: Sarı renkte olanlar Leptospirillum grup II, beyaz renkte olanlar Leptospirillum grup III (Fe(II) oksitleyen bakteri türü), mavi renkte olanlar ise farklı arkealardır [7].

hakkında sınırlı bilgi sağlıyor. Bu tür detaylar için FISH teknikleri başarıyla uygulanmaktadır (Şekil 6).

Bu gelinen noktada, AMS'nın çok çeşitli mikroorganizmalara ev sahipliği yapığını; bu çeşitliliğin kimi zaman bizi şaşırtacak dereceye ulaştığını görüyoruz. Örneğin, California –USA, Richmond Madenin de gelişen asit maden sahasında pH değerlerinin (pH<0) negatiflere ulaşmasına rağmen, bu aşırı ortamda mutlu mesut yaşayan bakteriler topluluğu belirlenmiştir.

Sonuçlar

İnsanoğlunun rüyası olan, modern hayat için gerekli olan sanayileşmenin temeli madencilğe dayanmaktadır; bu nedenle madencilik faaliyetleri kaçınılmazdır. Bu faaliyetler sırasında oluşabilecek çevresel tehditler zamanında ve gerekli tedbirler alınarak, en aza indirilebilir. Özellikle artan enerji ihtiyaçları nedeniyle, dünyada olduğu gibi ülkemizde ki düşük kalorili linyit yataklarının işletilmesi (Trakya Havzası gibi) bu günlerde gündemdedir. AMS'sı oluşumlarının yaygın olarak görüldüğü kömür sahalarının, rehabiliteasyon modelleri, işletmeye açılmadan oluşturulmalıdır. AMS'ı oluşumlarını anlamak, uygun rehabiliteasyon model ve stratejilerini geliştirmek, bilinenlerin yanı

sıra yeni mikrobiyal türlerin bu tür sahaların oluşumundaki rollerinin ortaya konmasına bağlıdır. Biyojeokimya bu tür çalışma konularını içeren bilim dalıdır. Dünyanın birçok saygın üniversitesinde temel çalışma konularından birini oluşturan bu bilim dalı, ülkemizde de yeni alınan projelerle artık adını duyurmaya başlamıştır [8]. Dünyanın birçok

ülkesinde öncelikli araştırma konuları arasında yer alan büyük bütçeli projelerin yapıldığı bu konu; gelişen bilim dünyasında yer almak isteyen ülkemiz için gerekli alanlardan biridir.

Kaynaklar:

- [1] Bryson, B., 2003. A Short History of Nearly Everything. Black Swan (UK);Broadway Books (US).
- [2] www.epa.gov (Environmental Protection Agency web sayfası)
- [3] <http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Image:Tbfo.gif>
- [4] Balcı ,N., Bullen, T. D., Witte-Lien, K., Shanks, W.C., Motelica, M. and Mandernack, K. W., 2006. δ Iron isotope fractionation during microbially stimulated Fe(II) oxidation and Fe(III) precipitation *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 622-639.
- [5,7] Baker BJ, Banfield JF (2003) Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiol Ecol* 44, 139–152.
- [6] Edwards KJ, Bond PL, Gihring TM, Banfield JF (2000) An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage. *Science* 279, 1796–1799.
- [8] Balcı, N. 2009 Asit Maden Sahalarının Oluşumunu Kontrol Eden Biyojeokimyasal Faktörlerin Araştırılması (TÜBİTAK-ÇAYTAG, 108Y177).