

MİKROORGANİZMALAR VE BİYOLOJİK JEOTERMAL PROSESLER

Ali Fazıl YENİDÜNYA

ÖZET

Jeotermal alanlar belirli canlı gruplarına optimum doğa koşullarını sağlayan özel yaşama ortamlarıdır. Bu koşullar çok yüksek sıcaklık (45-113°C) ve/veya çok düşük asidite (pH1-2), çeşitli gaz (hidrojen sülfür, karbon diyoksit gibi) ve bazı iz minerallerin karşılanması olarak özetlenebilir. Sıcak ortamlarda yaşamaya uyum sağlamış bu canlılar, ancak mikroskop ile görülebilecek kadar küçük yapılı (mikroorganizmalar) olmalarına karşın, buldukları ortamı gözle görünür şekilde değiştirebilmektedirler. Örneğin, mineralizasyon yoluyla oluşan kayaçlar, re-enjeksiyon kuyularının ve sıcak su dağıtım ağlarının tıkanmasına yol açan kireçlenme, bu doğal canlılık faaliyetleri sonucunda (biyomineralizasyon) ortaya çıkmaktadır. Öte yandan bu gibi sorunlar, aynı canlılık faaliyetlerinin teknolojik olarak yeniden düzenlenip kontrol edilebilir duruma getirilmesiyle de çözümlenebilmektedir. Jeotermal gaz tribünleri hidrojen sülfür gibi gazların atmosfere kontrolsüz salınımına neden olduğundan çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Jeotermal bölgeleri yaşama alanı olarak seçmiş mikroorganizmalar bu tür zehirli gazların tutuklanması için geliştirilmiş filtre sistemlerinin de bir bileşeni (biyofiltreler) durumuna gelmişlerdir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Japonya gibi zengin jeotermal kaynaklara sahip ülkeler, mikroorganizmaları bu kapsamda yaygın olarak kullanmaya başlamışlardır. Yeni Zelanda ve İzlanda da jeotermal bölgelerdeki canlılık faaliyetlerini anlayabilmek için büyük ölçekli projeler gerçekleştirmektedir. Bildiri kapsamında yukarıda anılan ülkelerde yürütülen çalışmaların başlıca örnekleri tanıtılmaya çalışılmaktadır.

1. GİRİŞ: HİDROJEN SÜLFÜR TUTUKLANMASINDA JEOTERMAL BİYOTEKNOLOJİNİN ÖNEMİ

Jeotermal güç istasyonlarından atmosfere hidrojen sülfür salınımının azaltılması için bir çok yaklaşım denenmiş olmakla birlikte, jeotermal bölgelerde endemik olarak bulunan doğal aerobik/asidofilik (oksijen ve asit seven) bakterilerden yararlanma yöntemleri pek denenmemiştir. Bu bakteriler (*Beggiotis*, *Thiothrix*, *Sulfolobus* vb.) hidrojen sülfürü temel enerji kaynağı olarak kullanırlar. Öte yandan biyolojik azaltım ya da biyofiltrasyon teknolojileri jeotermal dışındaki endüstrilerde uzun süreden beri uygulanmaktadır. Örneğin koku kontrolü, katı ve sıvı atıkların arıtımında biyolojik yöntemler temel bir işleve sahiptir.

Hidrojen sülfür bütün doğal ortamlarda bulunabilen bir gazdır. Organik maddelerin bakteriyel faaliyetlerle bozunması ile göl ve okyanus diplerinde, bataklıklarda ve hatta hayvanların barsaklarında doğal olarak üretilmektedir. Hidrojen sülfür öte yandan ham petrol, doğal gaz, volkanik gaz ve sülfür pınarlarının da bir bileşenidir. Bütün bu salınımlara rağmen hidrojen sülfür kontrol edilemez bir şekilde atmosferimizde ve sularımızda birikmemektedir. Çünkü doğal süreçler bu gazı bir çok farklı bileşiklere oksitlemektedir. Bu bağlamda bakteriyel oksidasyon, hidrojen sülfür düzeyini global boyutta indirgeyebilen ve bu nedenle yaşamsal öneme sahip bir mekanizma olarak bilinmektedir.

Hidrojen sülfürün atmosfere salınımını önleme çalışmalarının nedeni insan sağlığı üzerinde yaptığı fizyolojik hasarlardır. Bu gaz 3-10 ppm düzeyinde yalnızca hoş olmayan bir koku olarak karşımıza çıkarken, 1000 ppm düzeylerinde bayılma, solunum ve sinir sistemlerinin paralizine yol açabilmektedir.

Bu nedenlerden dolayı hidrojen sülfür salınımı jeotermal güç istasyonları için birincil önemli hava kalitesi konusudur.

Sülfür oksitleyen bakteriler yaşamaları için gereksinim duydukları hemen her maddeyi jeotermal kaynaklardan sağlayabildikleri için bu alanlara doğal uyum sağlamışlardır. Bu tür bakteriler bütün enerji gereksinimlerini inorganik bileşiklerden elde edebilen, kemoototrof, organizmalar olarak bilinmektedir. Karbon dioksit, organik bileşiklerin sentezinde kullanılan karbon kaynağını ve amonyum, protein yapımı için gerekli azot kaynağını oluşturur. Serbest karbonun tutulması için gereksinilen enerji sülfürlü bileşiklerin oksitlenmesinden sağlanır. Güç istasyonlarındaki atık ısı enerjisi de bu bakterilerin yaşama sıcaklığının korunması için gereklidir. Bunların dışında bakteri yalnızca hava ve fosfat kaynağına ihtiyaç duyar. Bu nedenle biyofiltrelerde kullanılan bakteriler jeotermal bölgelerdeki doğal ortamlardan kolaylıkla temin edilebilmektedir. Örneğin CalEnergy biyofiltrelerinde aktif olan bakterinin, asidik koşullara dirençli olan renksiz *Thiobacillus* olduğu sanılmaktadır [11]. Bu amaçla Japonya'da kurulan bir pilot tesiste de *Sulfolobus* seçimli olarak kullanılmıştır. Hidrojen sülfürün ilk oksidasyonunda serbest sülfür elementi elde edilir. Bu element daha sonra sülfürik asite dönüştürülmek için hücre içinde ya da dışında depo edilebilmektedir. Sülfürik asit üretimi ortam pH'ını 2'den daha küçük noktalara kadar düşürebilmektedir. Bu nedenle bu tür organizmalar asidofil (asit seven) olarak nitelendirilir. Bu üzerinde durulması gereken çok önemli bir noktadır. Çünkü düşük pH gibi ekstrem koşullarda yaşayabilen canlılar endüstriyel boyutlu sistemlerde rahatlıkla çoğaltılabilmektedir.

2. BİYOFİLTRELER

CalEnergy biyofiltre sistemi [11] fiberglas bir tank; bu tankın içinde damlalar halinde sıvı dolaşımını sağlayan bir boru ağı ve bakterilerin büyüme yüzey alanını arttırmak için kullanılan bir dolgu maddesinden oluşmaktadır. Dolgu maddesi üzerine fışkırtılan su sürekli dolaşımında tutularak bakteriler için gereksinilen besinin temini, kurumunun ve metabolik yan ürünlerin birikmesinin önlenmesi sağlanmaktadır. Dolgu materyalinin tümünün aynı oranda ıslatılabilmesi için sıvı dağıtım sisteminin bütün dolgu yüzeyini kuşatması gereklidir. Bu koşulun sağlanmadığı durumlarda, yetersiz su akışının olduğu bölgelerde, sülfür birikmesinden kaynaklanan problemlerle karşı karşıya kalınır. Bir biyofiltre sisteminin tasarımında yeterli dolgu materyalinin bulundurulması net sülfür birikiminin önlenmesi bakımından çok önemlidir. Çünkü dolgu materyalinin yeterli miktarda bulunması halinde sistem hidrojen sülfürün tümünü sülfürik asite dönüştürerek sabit bir denge durumunda kalır. Aksi bir durumda, sülfür sistemi tıkararak dolgu materyalini destekleyen granüler yapı üzerindeki yükün artmasına yol açar ve buna bağlı olarak da gazların sistemden dışarıya doğru yönelmesine önayak olur. Burada sülfür birikmesini kontrol eden temel faktör, bakterilerin stoklanmış sülfürden çok tercihen hidrojen sülfürü tüketmeleridir. Bu nedenle hidrojen sülfürün bol miktarda bulunduğu yerlerde bakteriler sülfürü depo ederler. Biyofiltrelerdeki hidrojen sülfürün yok edilmesi sonucunda tipik reaksiyon oranları 4500gr/m³/gün sülfür ve sülfürik asiti üretimi için de 2000 gr/m³/gün sülfürdür. Bu sonuçlardan sülfürik asit üretmek için tasarlanan sistemlerin sadece hidrojen sülfürün yok edilmesi için tasarlanmış olanlardan çok daha hacimli olmaları gerekmektedir. Maksimum sülfürik asit üretimi mümkün olan bütün dolgu yüzeyinin sülfür ile kaplanması sonucunda elde edilmiştir. CalEnergy filtrelerinde bu kaplama işlemi reaktörlerden ters (reverse) gaz akışı yolu ile yapılmaktadır. Sülfür, gaz girişine yakın olan bölgelerde birikmeye daha eğilimlidir ve bu eğilim gazın giriş bölgesinden uzaklaştıkça azalır. Bu nedenle gaz girişinin uzağındaki bölgelerde bulunan dolgu materyali sülfürden büsbütün yoksun kalacağından sülfürik asit üretemeyecektir. Gaz akışının ters yönde sağlandığı durumlarda, yukarıdan aşağıya ya da aşağıdan yukarıya doğru, sülfür birikimi dolgu materyali içinde daha düzgün bir biçimde dağıtılmış olur. CalEnergy sisteminde iki biyofiltre birbirine bağlı olarak da kullanılabilir. Bu durumda gaz akışının tersine döndürülmesi üst ya da alt kısımdaki gaz girişinden biri kullanılarak sağlanmaktadır. Sülfürün dolgu materyalinin tümüne dağıtılması sülfür/sülfürik asit oranını maksimize ederek sistemin tıkanmadan sürekli çalışmasını sağlar.

Gaz üfleyicileri yoğunlaştırılmayan gazlarla biyofiltreleri besler. Bu gazlarla birlikte biyofiltreye bir vana ile miktarı kontrol edilen hava girişi de sağlanır. Biyofiltre içindeki sıcaklığın yaklaşık 32°C'de (90F) tutulabilmesi düşük basınçlı buharın, gaz hattına enjekte edilmesi ile sağlanmaktadır. Islatılan bütün yüzeyler fiberglas ya da plastik gibi asite dayanıklı maddelerden yapılmıştır.

Sisteme giren su miktarının kontrolü ile, dolaşımdaki akışkanın pH'ı 1 ve 2 değerinde tutulabilir. Su kaynağı, normal kullanım suyu ve/veya sıcak kuyulardan yoğunlaştırılan amonyaklı sıvı olabilir. Bu nedenle sisteme giren ve sistemi terk eden sıvı miktarı birbirine eşittir. Dolaşım sıvısına, son konsantrasyonu en az 10 ila 20 mg/L olacak şekilde potasyum fosfat çözeltisi katılır. Sistemden çıkan akışkan, sıcak kuyudan yoğunlaştırılan materyalde çözünük halde bulunan amonyak gazının amonyum iyonuna dönüştürülerek soğutma kulelerinin yapısında kullanılmaktadır. Bu durum kulelerden amonyak gazı salınımını azaltmaktadır.

CalEnergy biyofiltre sistemleri Amerika Birleşik Devletleri'nde (Salton Sea Projesi) 1996 yılından beri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde hidrojen sülfür tutuklanmasının %99'un üzerinde bir etkinliğe ulaştığı ve sistem dışına salınan hidrojen sülfür miktarının 2 ppm'in altında olduğu ölçümlenmiştir. Bu açıklamalardan, biyofiltrelerin geleneksel hidrojen sülfür tutuklanması teknolojilerine daha ekonomik ve daha güvenilir bir alternatif teşkil ettiği görülmektedir. Biyofiltreler hem birincil hidrojen sülfür tutuklama sistemi olarak tek başlarına hem de geleneksel sistemlerin etkinliğini artırmak için ek üniteler halinde işlev görebilir. Filtreler için gerekli olan bakteriler jeotermal alanlarda doğal olarak var olan ve hidrojen sülfür tüketen mikroorganizmalardan kolaylıkla temin edilebilir.

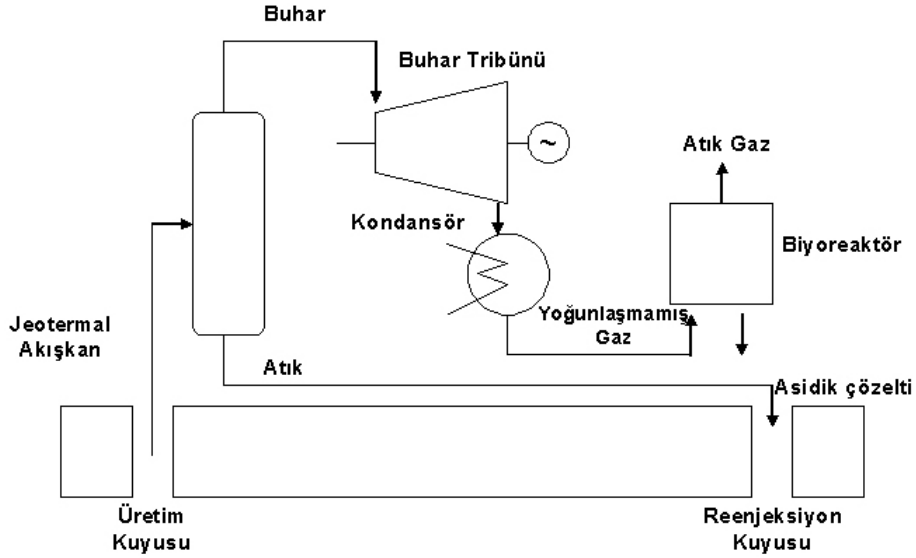
3. KİREÇLENMEYİ ÖNLEMELİK İÇİN TERMO-ASİDOFİLİK MİKROORGANİZMA KULLANIMIYLA SÜLFÜRİK ASİT ÜRETİMİ VE BİYOREAKTÖRLER

Akışkan ağırlıklı jeotermal güç istasyonlarında silika çökmesi sık sık ciddi problemlere neden olmaktadır. Bu problemlerden başlıcaları yüzey transport hatlarında boru tıkanmaları ve re-enjeksiyon kapasitesindeki ciddi azalmalardır. Örneğin, Japonya'nın Otake ve Hattyoubaru jeotermal alanlarında silika çökmesi re-enjeksiyon kapasitesini yılda %30 azaltmakta ve bu oranda da yeni kuyuların açılması gerekmektedir [3]. Öte yandan, birçok ülke jeotermal güç istasyonlarından atmosfere doğrudan hidrojen sülfür (H₂S) salınımının azaltılması için ciddi yasal düzenlemeler yapmaktadır.

Akışkanın pH'ının yaklaşık ≤ 5.5 'e düşürülerek silika çökeleği depolanmasının önlenilebileceği uzun zamandan beri en kolay ve en ekonomik yollardan biri olarak bilinmektedir. Bu bağlamda jeotermal güç istasyonlarından salınan H₂S'ten, termo-asidofilik bir bakteri türü olan *Sulfolobus sp.*'nin yardımıyla, sülfürik asit (H₂SO₄) üretilmesi bir çözüm yolu olarak önerilmiştir. Bu önerinin uygulanabilirliği önce laboratuvar ölçeğinde ve daha sonra da pilot ölçekli deneylerle araştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, *Sulfolobus sp.* kültürünün yapıldığı bir biyoreaktörde 0.06 kg/m³/h düzeyinde H₂SO₄ üretiminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sülfürik asit üretim sürecinin başlıca aşamaları aşağıda şematize edilmiştir (Şekil 3.1) [3].

İlk adım olarak üretim kuyusundan çıkan akışkan, buhar ve sıvı faza ayrıştırılmaktadır. Buhar fazı elektrik üretimi için buhar trübininden geçirildikten sonra bir yoğunlaştırıcıya gönderilmektedir. CO₂ gibi yoğunlaştırılmayan gazlar buradan içinde *Sulfolobus sp.*'nin çoğaltıldığı biyoreaktöre gönderilirler. Biyoreaktöre giren H₂S'in yaklaşık %70'i H₂SO₄'e oksitlenmektedir. Üretilen sülfürik asit re-enjeksiyon kuyusuna gönderilirken biyodönüşüme uğramayan gazlar atmosfere salınır.

Otake jeotermal güç istasyonu bir saatte 350 m³ sıvı ve 290 Nm³ gaz üretmektedir. Böyle bir sistemde rezervuar pH'ını 5.5' de tutabilmek için metreküp akışkan başına 1.2 L, 0.1 N H₂SO₄'e gereksinim olduğu hesaplanmıştır. Bu miktardaki bir asit üretimi için de 36 m³ iç hacimli bir biyoreaktör ve 146 m³/saat atık gazına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1 Çökelti oluşumunun bakteri kullanılarak önlenmesi

4. BİYOMİNERALİZASYON

Sıcak su kaynaklarında (hot springs) bakterilerin varlığı Yellowstone (ABD), Yeni Zelanda ve İzlanda'da detaylı olarak ortaya çıkartılmıştır. Silika çökeltileri içinde canlı bakterilerin keşfi, araştırmacıları, bu bakterilerin evrimsel süreçte bir polisakkarit kılıf geliştirdikleri ve bu kılıfın bakteri duvarı ve hücre içinin silifikasyonunu önlediği, fakat hücre dışındaki silika çökmesine öncülük ettiği ve böylelikle silika kayalarının (sinter growth) büyümesine yol açtığı sonucuna varırmıştır [5, 6 ve 8].

Bu kapsamda Yeni Zelanda jeotermal alanları doğal laboratuvarlar gibi kullanılarak biyomineralizasyonun jeokimyasal bakımdan incelenmesine başlanmıştır [8]. Bu çalışmada amaçlanan çözülmüş maddelerin (dissolved species) mikroplarla etkileşimini anlayabilmektir.

Çalışma, yedi jeotermal sistemi (Wairakei, Rotokawa, Waiotapu, Waikite, Ngatamariki, Orakei Korako, ve Tokaanu) kapsamaktadır. Her bir alana cam mikroskop lamaları yerleştirilmiş, bu lamalar üzerinde önce bakteri büyümesine ve sonra da biyomineralizasyonun oluşumuna izin verilmiştir. Ayrıca su örnekleri toplanarak Wairakei Laboratuvarı'nda analiz edilmiştir. Bu suların pH'ı 3.0- 8.5, sıcaklığı 49-100 °C aralığında değişim göstermektedir. Aşağıda her bir jeotermal alandan elde edilmiş olan bulgular özetlenmektedir.

4.1. Wairakei: Ana Drenaj (Main Drain) bölgesine içinde mikroskop lamaları bulunan iki adet plastik kap yerleştirilmiştir. Bu drenaj bölgesi batı sondaj alanından gelen atık sularla birleşmekte ve kimyasal olarak üniform bir yapı (pH (8.5), 1900 ppm Cl⁻, ve 570 ppm SiO₂) arz etmektedir. Normal koşullarda, örnekleme yapılan bölgedeki suyun akış hızı (flow rate) 1 m/s ve sıcaklığı yaklaşık 62 °C' dir. Ancak drenaj bölgesinin sol bölgesinde suyun derinliğine (yaklaşık 1m) bağlı olarak 62 °C' den 42 °C' ye kadar inen bir sıcaklık gradyenti bulunmaktadır. Bu drenaj bölgesinde mineralizasyon, beton duvarlar üzerinde, uçları aşağı doğru sivrilen fan şeklinde, renkleri beyazdan pembeye doğru değişen birikintiler halinde oluşmaktadır. Yağmur sezonunda bu şekiller, suspense olan materyalin tutuklanması ile, koyu kahve bir renk almaktadır.

Deneyin başlangıcında mineralizasyon, sıcaklığa bağlı olarak bir büyüme göstermiştir. Drenajın soğuk kısımlarındaki renk yeşildir ve bu siyanobakterilerin varlığına işaret etmektedir. Birikintilerin SEM

(taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmesi sonucunda yaklaşık 2 µm genişliğinde ve bilinmeyen uzunluklarda amorf silika liflerinden oluştuğu gözlenmiştir. Bu liflerin, filamentli bakteriler üzerinde oluşan ya da bu bakterilerle yer değiştiren silika tabakalarını temsil ettiği ve aralarında bol miktarda boşluk (void space) bulunduğu gözlenmiş ve bu gözlem TEM (transmisyon elektron mikroskobu) ile doğrulanmıştır. Su altı fotoğrafları ile daha başka ipuçları da bulunmuştur. Fotoğraflarda birikintilerin (fan) uçlarında akıntı ile hareket eden ince filamentler görülmüştür. Bu filamentler, mineralize olmamış bakterilerin varlığının delili olarak yorumlanmıştır. Örnekleme sırasında bu filamentler sudan çıkartılırken parçalanmakta ve bu nedenle gözlemlenememektedir. Daha sonra bu filamentli bakteri örnekleri laboratuvar ortamında (Hort Research) 60 °C'de çoğaltılabilmektedir. Bu bakterilerin pembe renkli oldukları gözlemlenmiştir. Pembe rengin ksanten pigmentinden kaynaklandığı ve bakteriyi ultraviyole ışınlar karşı koruduğu düşünülmektedir. Bakterinin taksonomik özellikleri henüz bilinmemekle birlikte karbon kaynağı olarak su daki erimiş CO₂' i kullandığı sanılmaktadır.

Başlangıçta örnekleme için yerleştirilen cam lamların ayda bir kez değiştirilmesi planlanmışken, mineralizasyonun çok hızlı olması nedeni ile (10 g/cm²-yıl) bu periyod sekiz güne indirilmiştir.

4.2. W59 Bölge Drenajı: Bu drenaj yaklaşık 85 °C gibi yüksek bir sıcaklığa sahip olması ve 20 m uzağında bir sondaj çalışması yapılıyor olduğu için seçilmiştir. Bu bölgede pH 8.2 olup ve 1450 ppm Cl⁻ ve 390 ppm SiO₂ içermektedir. Amorf görünümülü silika, SEM ile, kaba anhidral yapıların düzensiz toplulukları (agglomeration) halinde gözlemlenmiştir. Daha dikkatli bir inceleme sonucunda bu topluluklar arasında yuvarlak görünümülü (coccoid) parçacıkların varlığı farkedilmiştir. Bu parçacıklar silisifiye olmuş bakteri kalıntıları olarak yorumlanmıştır. Bu tür bakteriler 85 °C sıcaklıktaki taze sondaj suyunda, çok az besin kaynağının varlığında, yaşayabilmektedirler.

Bu bölgede sıcaklığın yüksek olması nedeniyle cam lamlar üzerinde oluşan silikanın büyüme oranı (rate) ölçümlenememiştir. Çünkü sıcak suda bu yapılanmalar kararsız (unstable) olup bir kaç ay içinde dağılarak yok olmaktadır (disintegration).

4.3. Kiriohineke Deresi (stream): Dere tabanı oturmamış (unconsolidated) toprak, bitki yaprak ve dallarından oluşmaktadır. Waraikei sondaj suyu (pH, 8.3; 1900 ppm Cl⁻; 580 ppm SiO₂) bu dereden geçmektedir. Taşlar ve bitki materyali üzerinde kalın bir silika tabakası oluşmuştur. Örnekleme için yerleştirilen cam lamlar üzerinde iki ay gibi bir süre sonunda yaklaşık 1 cm kalınlığında bir silika tabakası elde edilmiştir. Silika liflerinin, ana drenaj bölgesindeki benzemekle birlikte, karışık yönelimli (orientation) ve belirgin yeşil tabakalar halinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu tabakaların dere suyu sıcaklığının düşük olduğu dönemlerde ve siyanobakterlerin büyümesiyle oluştuğu düşünülmüştür. Fakat bu oluşumların sıcaklığın yükseldiği dönemlerde nasıl korunduğu bilinmemektedir. SEM ile incelenen bazı örneklerde farklı iki boyutta yapılanmalar görülmüştür. Bu durum iki farklı filamentli bakterinin varlığına işaret etmektedir. Örneğin, sıcaklığın düşük olduğu dönemlerde *Calothrix* gibi silikaya yeşil rengi veren filamentli siyanobakteriler büyümektedir. Silika liflerinin derin kısımlarında ise amorf yapılı silika kürecikleri (speheres) bulunmuştur. Bu da lifler arasındaki boşluklarda (void spaces) bakteriler tarafından indüklenen silisifikasyona işaret etmektedir. Yeterli bir süre verildiğinde bu boşluklar tamamen amorf silika ile dolmuş olacaktır.

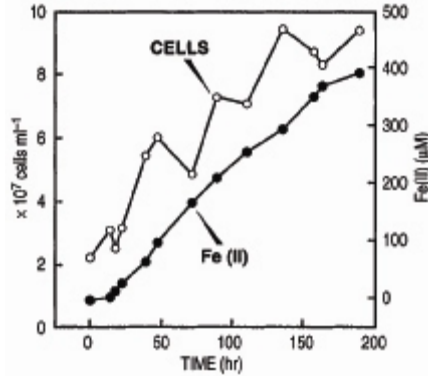
4.4. Rotokawa: Bu bölgedeki sıcaklık 60-85 °C ve pH 2.7-3.2'dir. Akışkan 400-1200 ppm Cl⁻ ve 600-1000 ppm SO₄²⁻ içermektedir. Sular süspansiyon halinde bulunan doğal kükürt, kil ve amorf silika nedeniyle bulanık (turbid) görünümüdür. Bu materyal akıntı ile taşınarak ince yapılı çamurdan kalın bir tabaka oluşturmuştur. Bu yapılar ilk önce su yüzeyinden yükselen zımpara taşı (pumice) ve odun parçaları üzerinde oluşur ve kalınlaştıkça koral şekilli yapılara dönüşürler. Ayrıca, çamur yüzeyinin altında (subsurface) sarı renkte tabakalar halinde amorf yapılı arsenik sülfür mineralizasyonunun yer aldığı gözlemlenmiştir.

Bu bölgedeki yapılanmaların nasıl oluştuğu ve iz metallerin bu yapılara nasıl katıldığını araştırmak için bir dizi cam plaka (lam) çamur içine doğru belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Bir ay süreli periyotlarla

örnekleme yapıldığında su içerisinde hiç bir büyümenin olmadığı gözlemlenmiştir. Su yüzeyini yukarısında kalan bölgede ise sıcaklığın 45°C olması termofilik mikroorganizmaların büyümesini engellemiştir. Bu gözlemlere dayanarak cam plakanın ancak yatay durumda olması halinde mikroorganizma faaliyetinin mümkün olabileceği kanısına varılmıştır. Bu nedenle Rotokawa'nın ana yukarı akış (main upflow) bölgesinde deney yinelenmiştir. Bölgede sıcaklık 90°C ve akışkan kimyası tipik bir asit sülfat havuzunu andırmaktadır (pH 3.8, 1500 ppm Cl⁻, 420 ppm SO₄²⁻, 336 ppm SiO₂). Cam plakalar, bu kez, gölün kenarına yakın ve tamamen su ile örtülebilecek şekilde yerleştirilmişler. Örnekleme yapıldığında cam plaka yüzeyinin bulanık sudaki ince çamurun oluşturduğu ince bir tabaka ile kaplı olduğu görülmüştür. Bu tabakanın ince sülfür, kil (clays) ve amorf silikadan oluştuğu anlaşılmıştır. SEM ile çalışmalar belirgin bir mikroorganizma faaliyetini ortaya çıkarmaz iken TEM sonuçları bir kaç filamentsiz bakterinin varlığına işaret etmiştir. Tüm bu çalışmalar ışığında, sıcak su içinde belirli bir noktaya kadar mikroorganizma faaliyetinin olabileceği fakat su yüzeyinin hemen üzerinde bu faaliyetin çok daha fazla olacağı sonucuna varılmıştır.

5. BİYOMİNERALİZASYONUN MİKROBİYAL ETKİLENİME DAYALI KOROZYON ÜZERİNDEKİ ROLÜ

Mikrobiyal etkilene dayalı korozyon (microbiologically influenced corrosion, MIC), farklı fizyolojik özellikler gösteren bakteri gruplarının karmaşık yollarla etkileşimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [4,10]. Ancak bu farklı gruplar içinde yer alan bakterilerin çoğu henüz karakterize edilmediğinden, grup üyeleri arasındaki karmaşık etkileşimlerin doğası da bilinmemektedir. Korozyonun nedeni olarak sık sık dile getirilen organizma grupları, sülfat indirgeyen bakteriler (sulfate reducing bacteria, SRB) ve metal depolayan bakteriler (metal-depositing bacteria)'dir. SRB bir çok korozyon tepkimesini başlatan sülfürü üretirken, metal depolayan bakteriler gözle görünür mangan ve/veya demir oksitlerini içeren yumruların (tubercles) oluşmasına neden olmaktadır. SRB her yerde bulunur; kültüre alınımı ve sayımı kolaydır. Bu nedenle SRB grubu üyelerinin tanınabilen ticari kitler bile geliştirilmiştir. Ayrıca, SRB'in bakır ve demirli substratlar üzerinde indükledikleri korozyon prosesleri için mineralojik parmak izleri (mineralogical fingerprints) bile tanımlanmıştır [4]. Yandaki grafik, demir indirgeyen bakterilerin çoğalma ve indirgeme ilişkisini özetlemektedir [4].



Öte yandan değişken demir ve/veya mangan indirgenmesi, hem oksijensiz (anaerob) hem de oksijenli ortamda (fakültatif anaerob) yaşayabilen mikroorganizmalarca gerçekleştirilir. Bu bağlamda korozyona neden olan ve hakkında en az bilgiye sahip olunan bakteri gruplarından birisi değişken metal indirgeyicileri (dissimilatory metal reducers)'dir. Bu grup bakteriler mangan (Mn IV) ve demiri (Fe III) indirgemektedirler. İnhibisyon ve rekabet deneyleri, Mn (IV) ve Fe (III) ün, nitratlara benzer şekilde, sülfat, karbondiyoksit gibi düşük elektron akseptörlerini ekarte edecek kadar redoks yeteneğine ve elektron alma etkinliğine sahip olabildiklerine işaret etmiştir [4].

Bir çok oksijen seven (aerobic) bakteride asimilatör demir indirgeyen enzimler (assimilatory ferric reductases) yaygın olarak bulunur. Absorbsiyon, demirin kendiliğinden demir oksitlere dönüşmesi nedeniyle, düşük demir konsantrasyonlarında gerçekleşmektedir. Bu bakterilerin çoğu, çevreden düşük konsantrasyonlu demiri hücre içine alabilmek için, siderofor (siderophore) denilen yapılar

geliştirmiştir. Siderofor ile kompleks halinde hücre içine taşınan Fe(III) enzimatik olarak indirgendikten sonra siderofordan ayrılır [4].

Demir indirgeyen bakterilerin, karbon çeliklerinin korozyonunda rol aldıkları bilinmektedir [1, 12]. Örneğin, 160°C'de termal akışkan sıcaklığına sahip jeotermal güç istasyonlarında kullanılan karbon çeliğinden yapılmış ısı değiştirme borularını (heat exchanger tubes) kalsiyum silikat ve silika çökmesinin yol açtığı korozyon ve tıkanmaya (fouling) karşı korumak için, boru iç yüzeyleri polifenilensülfide dayalı kaplama sistemleri (PPS-based systems) kullanılmıştır [12]. PPS kaplama sistemi anti-oksidan katkısı sağlayan politetrafloroetilen (PTFE), termal kondüktivite dolgusu olarak silikon karbid (SiC) ve yorulmaya karşı dirençlilik veren alüminyum oksit bakımından zengin kalsiyum alüminat (ACA) içermektedir. Bu sistemle kaplanan borular güç istasyonunda 11 aylık bir süre boyunca test edildikten sonra incelenmeye alındıklarında PPS kaplama sistemlerinin mükemmel bir termal stabilite gösterdikleri, akışkan sıcaklığına karşı dayanıklı oldukları ve akışkan geçirgenliğine dirençli oldukları gözlenmiştir. Tüm bu veriler ışığında PPS kaplama sistemlerinin, boruları korozyon, ıslak ve zor jeotermal çevre koşullarına karşı yeterince koruyabildikleri söylenebilir. Bunun ötesinde PPS üst tabakalarının PTFE ile modifikasyonu, kaplamanın hidrotermal oksidasyonunu önlemiş; böylelikle çökelti oluşumunu engelleyerek yüzeyleri çöktillerle oluşturabilecekleri reaksiyonlara duyarlı kılmıştır. Bu nedenle, kaplama yüzeylerinde biriken çöktiller sisteme düşük basınçlı su verilerek uzaklaştırılabilmektedir. Fakat bu test sürecinde boruların, paslanmaz çelikten yapılmalarına rağmen, dış yüzeylerinde oluşan pasif oksitlenme tabakaları kireçlenmeye karşı daha duyarlı oldukları saptanmıştır.

Soğutma kulelerindeki beton sıva (concrete) tabakalarının da mikrobiyolojik etkileşim yoluyla korozyondan (MIC) etkilendiği bilinmektedir [2]. *Thiobacillus thiooxidans* ve *Thiobacillus ferrooxidans* gibi sülfürik asit üreten bakteriler beton malzemesi üzerinde agresif etkiler sergileyebilmektedir. Çalışma kapsamında üç farklı koruyucu kaplama materyali, epoksi katkılı harç (epoxy-modified mortar), lateks katkılı harç (latex-modified mortar) ve kalsiyum alüminat harcı (calcium aluminate mortar), beton malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca çimento tipi, silika buharı ve sıcak fırın atıklarının (blast furnace slags) beton malzemesi dayanıklılığı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Yapılan laboratuvar ve alan uygulamaları sonucunda epoksi kaplaması ve kalsiyum alüminatın en iyi performansı verdiği saptanmıştır.

Tablo 5.1. Test edilen betondaki karışım oranları [2].

	Tip I	Tip V	%5 Silika Buharı	%10 Silika Buharı	%40 Atık	%60 Atık
Tip I çimento (kg/m ³)	348.4		340.0	322.2	208.3	138.7
Tip V çimento (kg/m ³)		348.9				
Silika buharı (kg/m ³)			17.9	35.8		
Sıcak fırın atığı (kg/m ³)					138.9	208.0
Su (kg/m ³)	139.4	139.5	143.2	143.2	138.9	138.7
İnce çökelti (kg/m ³)	8243.6	824.7	846.1	846.1	820.6	819.5
Kaba çökelti (kg/m ³)	918.6	919.9	943.7	943.7	915.3	914.1
Superplasticizer (kg/m ³)	3.49	3.49	3.58	3.58	3.47	3.47
Birim ağırlık (kg/m ³)	2230	2233	2291	2258	2222	2219
28 kompresif güç (MPa)	40.9+/-1.0	36.1+/-1.0	45.0+/-1.3	47.9+/-0.8	50.8+/-0.4	35.4+/-1.8

6. JEOTERMAL ATIKLAR İÇİN İLERİ BİYOKİMYASAL PROSESLER

Son yıllarda jeotermal atıkların (brines) son ürün olarak, hem çevre ile uyumlu hale getirilmesi hem de bu atıklarda eser miktarlarda bulunan radyoaktif ve benzeri maddelerin konsantre edilerek endüstriyel anlamda değerlendirilebilmesi gündeme gelmiştir. Konuya temel yaklaşım, önce biyokatalizör rolü üstlenebilecek birçok mikroorganizmayı tanımlamak ve sonra da bu mikroorganizmaların jeotermal

atıklar üzerinde biyodönüşüm (bioconversion) yapabilirliklerini laboratuvar ölçekli deneylerle test etmek olmuştur. Örneğin Premuzic (2002) tarafından rapor edilen bir çalışmada bu tür bir yaklaşım ile kalitesi yüksek (high grade) amorf silika üretimi, ekonomik bakımdan değer taşıyan metal ve tuzların yeniden kazanımı ve kalan atığı da çevreye uyumlu hale getirmek hedeflenmiştir. Ayrıntıları açık bir dille verilmemekle birlikte, projenin başarı ile sonuçlandığı ve 1997 yılında projenin yürütüldüğü Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'na "National Award for Environmental Sustainability" ödülü ile birlikte "Certificate of Environmental Achievement" gibi bir çok sertifikanın verildiği anlatılmaktadır. Bu bağlamda ayrıca CalEnergy ile endüstriyel boyutta ortak çalışmaların başlatılmış olduğu rapor edilmiştir.

7. TÜRKİYE JEOTERMALLERİNDE MİKROBİYOLOJİK ÇALIŞMALAR

Ülkemizin jeotermal bölgelerinde bugüne kadar yukarıda anılan örneklere benzer biçimde mikrobiyolojik florayı da göz önünde bulunduran herhangi bir bilimsel çalışma yapılmamıştır. Ancak sıcak seven (termofilik) mikroorganizmalar biyoteknolojik yönden de önemli oldukları için; yalnızca bu kapsamda, İtalyan araştırmacı Manachini'nin ekibi Denizli-Kızıldere Bölgesi'nde 30'a yakın bakteri izolatu üzerinde temel bilimsel düzeyde bir araştırma yaptıklarını rapor etmişlerdir [7].

Termofilik mikroorganizmalardan belirli endüstriyel önemli enzimleri üreten bakteri grubunu konu alan bir yüksek lisans tez çalışması 2001 yılında tarafımızdan başlatılmıştır. Örnekleme alanı yalnızca Balçova Jeotermal Bölgesi ile sınırlı tutulmuştur. Örnekleme işlemi, 60-65 °C sıcaklığa sahip olan re-enjeksiyon suyu, Tedavi Merkezi'ndeki toprak ve çamur üzerinde yapılmıştır. Bugüne kadar 128 bakteri örneği saflaştırılmıştır. Bu örnekler toplam altı farklı enzim aktivitesi göstermektedirler. Enzimlerin hepsi bakteri tarafından dış ortama salındıklarından (extracellular enzymes) tarama çalışmaları çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapıla genetik deneyler sonucunda, bu 128 izolatu yaklaşık 15 farklı bakteri grubunu içerdiği belirlenmiştir. Bulguların, Eylül 2003 tarihine kadar, bilimsel bir makale halinde uluslararası bir dergide yayınlanması planlanmaktadır.

Yukarıda anılan her iki çalışmada da konu edilen mikroorganizma grubu, sülfür okistlemeyen bakterileri kapsamaktadır. Kızıldere ve Balçova Jeotermal Bölgesi'nde Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü ve değişik bilimsel araştırma ekipleri tarafından yürütülen araştırmalar kapsamında jeotermal akışkan analizleri yapılmıştır (Tablo 7.1). Her iki bölgede de hidrojen sülfür miktarının, toplam akışkan hacminin yaklaşık 1/1000'i kadar (yaklaşık 1000 ppm) olduğu rapor edilmiştir. Yukarıda açıklandığı üzere (Giriş 1) bu miktar, sülfür oksitleyen mikroorganizmaların yaşayabilmesi için yeterli olduğu söylenebilir.

Tablo 7.1. Kızıldere jeotermal sahasında bazı üretim ve gözlem kuyularının gaz analizi (MTA, 1996; Gökçen, kişisel bilgilendirme).

Kuyu no.	Örnekleme tarihi	H ₂ (% Hac.)	O ₂ -Ar (% Hac.)	N ₂ (% Hac.)	CH ₄ (% Hac.)	CO ₂ (% Hac.)	H ₂ S (% Hac.)	He (ppm)
KD 6	09/05/88	0.3	0.1	1.8	0.3	97.5	< 0.1	5.4
KD 6	15/06/88	< 0.1	2.7	11.8	< 0.1	85.5	< 0.1	5.9
KD 6	06/06/88	< 0.1	2.1	8.5	< 0.1	89.4	< 0.1	8.2
KD 7	08/05/88	< 0.1	0.1	0.5	0.1	89.3	< 0.1	15.6
KD 7	29/06/88	< 0.1	2.4	8.8	< 0.1	88.8	< 0.1	7.7
KD 14	30/06/88	< 0.1	11.6	42.6	< 0.1	45.8	0.1	11.6
KD 16	29/06/88	< 0.1	2.4	9.2	< 0.1	88.4	< 0.1	10.9
KD 21	23/06/88	< 0.1	1.6	3.6	< 0.2	94.8	< 0.1	14
KD 22	08/05/88	< 0.1	0.6	1.7	0.1	97.5	< 0.1	15

SONUÇ

Jeotermal bölgeler ekstrem koşullarda yaşamayı seven mikroorganizmalar (extremophiles) için çok özel yaşama alanlarıdır. Bu grup canlı faaliyetleri jeotermal sistemlerde karşılaşılan bir çok sorunun nedeni olmakla birlikte, bu sorunların çözümünü de kendilerinde taşımaktadırlar. Bu bağlamda, herhangi bir jeotermal bölgedeki mikroorganizma çeşitliliğinin ortaya çıkartılması jeotermal süreçlerde bu canlılardan yararlanabilmenin birincil koşulu olarak kabul görmelidir. Örneğin herhangi bir jeotermal ısı dağıtım ağının mikroorganizmaya dayalı korozyona karşı nasıl korunacağı ya da bu durumun göz önünde bulundurularak malzeme seçimi ve geliştirilmesi gibi konular, yerel mikroorganizma florasının faaliyetlerinin yakından bilinmesini ve buna dayalı olarak yapılması gerekli olan laboratuvar ve pilot alan çalışmalarını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu tür bir yaklaşım biyofiltre sistemlerinde olduğu gibi yeni teknolojilerin de gelişmesine yardımcı olacaktır. Yukarıda anılan örneklerden de anlaşılacağı gibi, her hangi bir teknolojik süreçte olduğu üzere, jeotermal süreçlerde de elde edilen başarıya ya da karşılaşılan sorunların çözümü, ilgili bütün faktörlerin hesaba katılmasını ve çok yönlü bir yaklaşımı gerektirmektedir. ABD ve Japonya gibi jeotermal kaynaklar bakımından çok zengin ve gelişmiş ülkelerde son on yılda, bu alanda, çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Jeotermal potansiyel bakımından dünyada yedinci sırada bulunan ülkemizde de buna benzer fakat yerel çözümler üretmeye yönelik araştırmaların bir an önce başlatılmasını diliyoruz.

Teşekkür: Bildiride yer alan şekillerin yapımındaki katkıları için Mert SUDAĞIDAN' a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Allan, M.L. Coatings for Protection of Equipment For Biochemical Processes,ing of Geothermal Residues. Research Summaries - Conversion Technology. U.S. Department of Energy, Geothermal Energy Technical Site, 2002.
- [2] Brendt, M.L. Protection of Concrete in Cooling Towers from Microbiologically Influenced Corrosion. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 25, 3-7, 2001.
- [3] Hirowatari, K., Kusaba, S., Takeuchi, K. and Fujioka, Y. Production of Sulfuric Acid Using Thermo_Acidophilic Microorganisms For Use in Scale Prevention. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 21, 55-59, 1997.
- [4] Little, B., Wagner, P., Hart, K., Ray, R., Lavoie, D., Neelson, K., Aguilar, C. The role of biomineralization in microbiologically influenced corrosion. Biodegradation, Vol. 9, 1–10, 1998.
- [5] McKenzie, E., Brown, K.L., Cady, S.L., Campbell, K.A. Trace metal chemistry and silification of microorganisms in geothermal sinter, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Geothermics, Vol. 30, 483-502, 2001.
- [6] Nancollas, G.H., Wu, W. Biomineralization mechanisms: a kinetics and interfacial energy approach. Journal of Crystal Growth, Vol. 211, 137-142, 2000.
- [7] Mora, D., Fortina, M.G., Nicastro, G., Parini, C., Manachini, P.L. Genotypic characterization of thermophilic bacilli: a study on new soil isolates and several reference strains. Research in Microbiology, Vol.149, 711-722, 1998.
- [8] Mountain, B.W., Benning, L.G., Graham, D.J. Biomineralization in New Zealand Geothermal Areas. Proceedings 23rd NZ Geothermal Workshop, 2001.
- [9] Premuzic, E. T.. Advanced Biochemical Processes for Geothermal Brines. Research Summaries - Conversion Technology. U.S. Department of Energy, Geothermal Energy Technical Site. 2002.
- [10] Pryfogle, P.A. Geothermal Biocorrosion. Research Summaries - Conversion Technology. U.S. Department of Energy, Geothermal Energy Technical Site. 2002.
- [11] Sonnevile, A., Carlsen, B. and Flores, C. Biological Abatement of Hydrogen Sulfide in a Geothermal Process. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 25, 37-40, 2001.
- [12] Sugama, T., Elling, D. Poly(phenylenesulfide)-based coatings for carbon steel heat exchanger tubes in geothermal environments. Journal of Materials Science, Vol. 37, 4871 – 4880, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Fazıl YENİDÜNYA

Ali Fazıl Yenidünya 13 Nisan 1962 yılında Sivas'ta doğdu. 1987 yılında Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü'nde lisans diplomasını aldı. 1988 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'nın Master ve Doktora bursu ile İngiltere'ye gitti. 1992 yılında Londra Üniversitesi'nden doktora derecesi aldı. 1993-1994 yılında UNIDO/ICGEB bursu ile İtalya'nın Trieste kentinde araştırmacı olarak çalıştı. 1994-1998 yılları arasında TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi'nde uzman araştırmacı olarak çalıştı. 1998-2000 yılları arasında Kopenhag (Danimarka) Eczacılık Yüksek Okulu'nda Araştırmacı Asistan Profesör (Research Assistant Professor) olarak çalıştı. 28 Mart 2000 yılından beri İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.