

JEOTERMAL SU KULLANIMINDA KABUKLAŞMA VE KOROZYON PROBLEMLERİ

Ahmet ÇAKIR

ÖZET

Kabuklaşma ve korozyon jeotermal su kullanımı sırasında ortaya çıkan, tesis veya sistemlerin ömrünü, verimliliğini etkileyen önemli oluşumlardır. Gazlaşma, buharlaşma ve soğumaya bağlı olarak ortaya çıkan kabuklaşmanın ana sebebi CaCO_3 ün göreceli çözünmezliğidir. Kabuk oluşum mekanizmasının bilinmesi ve iyi anlaşılması buna karşı alınacak önlemlerin ve temizleme metotlarının seçiminde önemlidir.

Jeotermal suların korozyon etkisi, ortamın kimyasal bileşimine çok yakından bağlıdır. Ortamdaki korozyon yapıcı iyonların yanı sıra, içindeki CO_2 'yi kaybetmesine bağlı pH değişimleri korozyonu etkileyen diğer parametrelerdir.

Bu çalışmada kabuk oluşum mekanizması ve bunun önlenmesi için alınması gereken önlemlerle beraber suyun yüzeye çıkarılması ve kullanımı sırasında ortaya çıkma olasılığı bulunan korozyon problemleri üzerinde durulacaktır.

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji, özellikle 70 li yıllardaki şok petrol fiyatları arkasından, sürdürülebilir gelişmenin önemli bir parçası olan enerji politikaları içinde hak ettiği yeri almıştır. Ancak dünyada üretilen toplam enerji içindeki payı %2 dolaylarındadır [1]. 150°C üzerindeki yüksek sıcaklık suları enerji üretiminde kullanılırken, düşük ($T < 70^\circ\text{C}$) sıcaklık suları doğrudan kullanılırlar. Jeotermal enerjinin ülkemizdeki ana kullanım alanları mekanların ısıtılması, evlerin sıcak su ihtiyacının karşılanması, seraların ısıtılması, kaplıca tedavisi, CO_2 ve kurubuz üretimi, ısı pompaları ve enerji üretimini içine almaktadır.

Türkiye'nin jeotermal enerji ve doğrudan kullanım kapasiteleri sırayla 4500 MWe ve 31500 MWt dir [1]. Doğrudan kullanım ise %0,005'i değerlendirilmektedir. Türkiye'nin toplam enerji üretimi içinde bunun payı %0,09 dolaylarındadır. Bunun 2020 içinde hedeflenen payı %0,32 olup, önümüzdeki 5 sene içinde %3,5 gibi artış öngörülmüştür.

Jeotermal enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve kullanımında karşılaşılan çeşitli sorunların üstesinden gelebilmek için yaratıcı çözümlere gereksinim vardır. Bu sorunlar, aralarında bazı çakışmaların olabileceği şu ana gruplar içinde toplanabilir: kaynak geliştirme ve yönetimi, enerji üretimi ve kullanımı, enerji dönüşüm tasarımı ve optimizasyonu, çevre mühendisliği ve araç gereçlerin korozyonu ve kabuklaşma [2]. Tüm bu alanları kapsayan ve uzun yılları arkasına alan çalışma ve çabaların sonunda her kaynak için geçerli bir fiziksel ve matematiksel model geliştirilememiştir. Kaynakların ve kullanım sistemlerinin çeşitliliği böyle bir genellemenin önündeki en büyük engeldir. Dünya genelinde daha çok tarımsal aktivitelere, mekanların ısıtılması ve soğutulmasına ve çeşitli ısıl işlemlere dönük olarak kullanılan jeotermal enerji kaynakları üzerindeki çalışmalar, verimliliğin artırılması ve korozyon ve kabuklaşma ile ilgili problemlerin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadır. İkincil

bir sıvının kullanıldığı çeşitli ikili çevrimler ve üretim kuyularında çift fazlı akışı değerlendiren toplam akış kavramı bu problemi çözümleyici adaylar arasındadır.

Bu çalışmada jeotermal tesislerin verimliliği ve ömrü üzerinde önemli etkisi olan kabuklaşma ve korozyon konuları üzerinde genel değerlendirmeler yapılarak, bu problemlerin çözümlerine yönelik yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

2. KABUKLAŞMA

2.1 Genel

Su, içinde bulunan çözünmüş iyonların türüne ve miktarına bağlı olarak ya mineral kabuklarının oluşmasını teşvik eder veya bunları çözer. Mineral kabuklarının oluşma mekanizması (1) suyun belli bir mineral ile ulaştığı doygunluk derecesine, (2) sıcaklık ve basınç değişim hızına ve (3) suyun pH derecesine bağlıdır. Herhangi bir mineralin sudaki çözünürlüğü, sıcaklık, basınç, pH, redox potansiyeli ve çözeltideki maddelerin göreceli konsantrasyonuna bağlıdır. Çözünürlüğü kontrol eden bu parametrelerdeki değişime bağlı olarak suda çözülmüş maddeler çökerek değişik şekillerde kabuk oluşturabilirler.

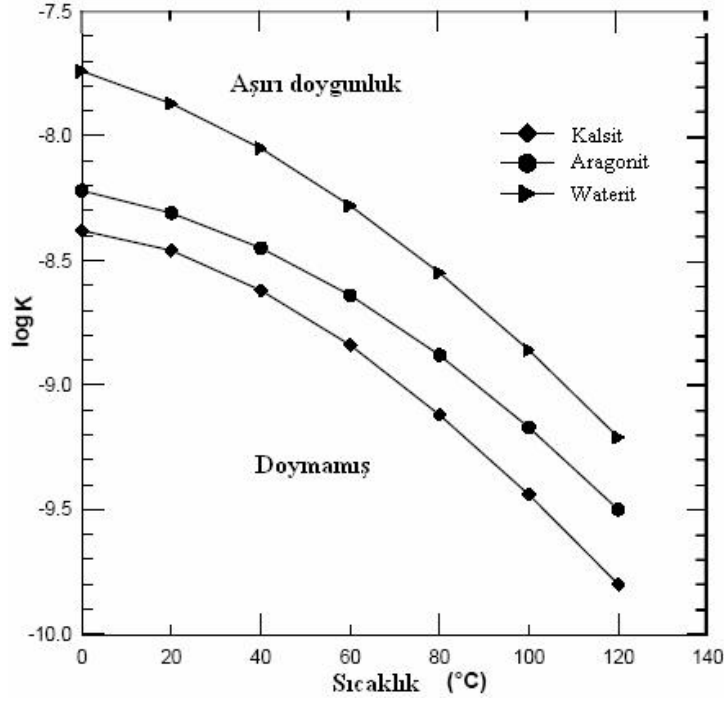
Suyun içinde çözülmüş olarak bulunan gaz miktarı, suyun akiferden yüzeye çıkışına bağlı olarak basınçta meydana gelen değişime ve sudaki çözünen bileşenlere bağlı olarak da değişir. Sudaki gazların kısmi basınçlarındaki artış sudaki diğer bileşenlerin hareketliliğinde artış veya azalma meydana getirebilir. Örneğin O₂ demir iyonlarının hareketliliğini azaltırken CO₂ kalsiyum başta olmak üzere birçok bileşenin hareketliliğini artırır. O₂, jeotermal yer üstü tesislerinde demir bileşikli çökelti oluşumunda etkin rol oynar. Doğal su kaynaklarında bulunan çözülmüş CO₂ gazı, derin kuyulardaki basınç altında karbonik asit'e dönüşür. Bu da suyun pH derecesini düşürür. Tüm kayalarda bulunan demir taban sularında bikarbonatlar halinde çözünür. Hava ile temas halinde çözülmüş ferros iyonları kolloid ferrik iyonla oksitlenirler.

Kütle transferlerinin çeşitli kimyasal reaksiyonlarla birleştiği hidrotermal kuyularda mevcut olan denge koşulları, jeotermal kullanım işleminin her kademesinde sıcaklık ve basınç yönünden önemli değişimlere uğrarlar. Bu değişimler çeşitli minerallerin çözünürlüğüne etki eder. Örneğin sıvı sıcaklığının düşüşü kükürtlü metal bileşiklerinin çözünürlüğünü azaltır ve onların ayrı veya beraber çökmesini teşvik ederken, CaCO₃ için tersi işlem geçerlidir, çünkü kalsit düşük sıcaklıklarda daha çok çözünür. Sıvı basıncındaki değişiklikler faz dönüşümüne neden olabilir; çözülmüş gazların çözeltiden uzaklaşması pH derecesine, dolayısıyla kalsiyum karbonat ve sülfür minerallerinin çözünürlüğüne çok etki eder.

Orta ve düşük sıcaklıklardaki jeotermal sistemlerde CaCO₃ kabuklaşmasına işaret edilen çalışmalarda[3,4] çözülmüş gazların sıvılardan arınması halinde kalsit kabuklaşmasının meydana geldiği rapor edilmiştir. Gazsızlaşmanın sınırlandırılması ve buna bağlı olarak karbonat minerallerinin doygunluğa erişmesine neden olan pH değişiminin kontrol altına alınması ile bu sistemlerdeki kabuk çökmesi önlenir. Jeotermal enerji kaynaklarının büyük çoğunluğunda yapılan çalışma ve incelemelerde, özellikle çelik boruların içinde oluşan kabukların bileşiminde, sistemdeki metalik parçaların korozyonundan kaynaklanan önemli miktarlarda element izine rastlanmıştır [5,6,7,8] . Jeotermal boru hatlarından alınan sular da çeliklerin korozyonundan kaynaklanan P, Cr, Mn, Ni, Mo iz elementlerine, korozyon ürünü olan çökeltilerin (geotit, pirit, opal gibi) içinde de çeliklerin korozyonundan gelen element izlerine rastlanılmıştır [8] .

2.1.1. Kalsiyum Karbonat Çökmesinin Kimyasal Esasları

Kalsiyum karbonat allotropik bir mineral olup, yaygın bulunan iki allotropu *kalsit* ve *aragonit*'tir. Üçüncü allotropu *vaterite* normal atmosferik koşullarda kristalleşen yarı kararlı bir mineraldir. Karbonat minerallerinin çözünürlüğü ortamın pH değerinden ve jeotermal sulardaki çözünmüş CO_2 aktivitesinden çok etkilenir. Verilen herhangi bir basınç ve sıcaklıkta, bir buhar fazı ile dengede olan çözeltilerdeki kalsit çözünürlüğü önce artan CO_2 konsantrasyonu ile 1 mol/kg'a kadar artar, daha sonra da yüksek CO_2 konsantrasyonlarına doğru azalır [9]. Buhar fazında verilen bir CO_2 basıncında $CaCO_3$ çözünürlüğü artan sıcaklıkta azalır (Şekil 1).



Şekil 1. Kalsit, aragonit, ve vaterit'in sıvı modele göre log K çözünürlük çarpımı [9].

Jeotermal sularda $CaCO_3$ çökmesi Ca^{+2} iyonlarının CO_3^{-2} iyonları ile birleşmesinden meydana gelir. Aşırı doygunluğun termodinamik şartları sağlanınca kalsit kabukları hızlı şekilde çökler. CO_2 kaybı ve bununla ilgili pH artışı kalsit çökmesinin ana sebebidir. Sıcaklık 25 den 100 °C ye arttıkça kalsit çözünürlüğü azalır ve çözünürlük çarpımı (product) 250 °C ye kadar azalmaya devam eder. Kalsit, aragonite (ve diğer $CaCO_3$ mineralleri)'in çözünürlüğü (1) eşitliğinde belirtilen reaksiyonla ifade edilir.



Bu denklemde denge sabiti K' ;

$$K' = \frac{(Ca^{+2})}{(H^+)^2} \times P_{CO_2} \quad (2)$$

(2) eşitliği ile hesaplanır. Parantez içindeki değerler aktivitelerdir. Sıcaklığa bağlı olarak değişme eğiliminde olan $(Ca^{+2})/(H^+)^2$ oranı, herhangi bir sıcaklık ve basınçta P_{CO_2} basıncını

sabitleyecektir. Kalsit veya aragonit gibi CaCO_3 fazlarının ayrışma veya çökmesi alttaki reaksiyonla verilir:

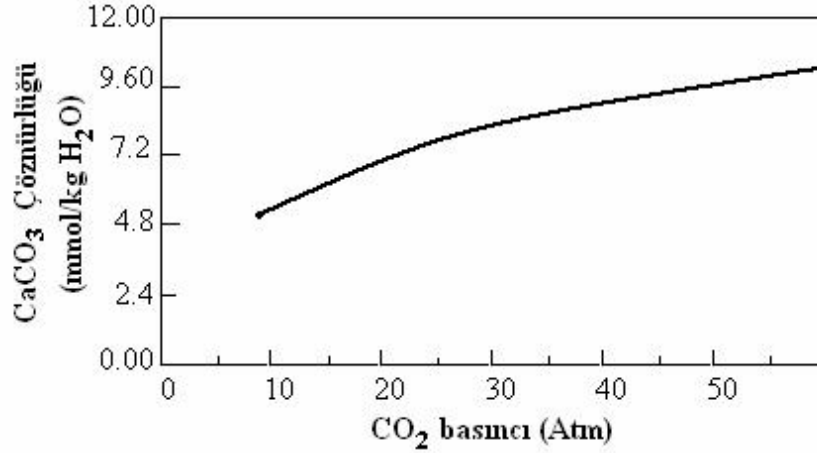


Sıvıda çözülmüş CO_2 , ortamda var olan (eğer varsa) CO_2 buharları ile dengede olacaktır. CO_2 'nin sıvıdan gaz fazına geçici sıvı CO_2 konsantrasyonunun azalması ile sonuçlanacaktır, ki bu da (3) numaralı reaksiyonun sola doğru yönelmesine sebep olur. Bu nedenle çözültiden CO_2 kaybı, CaCO_3 çökmesi ile sonuçlanacaktır. Buna paralel bir başka reaksiyon:



olup, sıvıdan gaz fazına CO_2 kaybı (4) reaksiyonunu sola yönlendirir ve çözeltinin pH değeri de artar.

Reaksiyon (3) den görülebileceği gibi, kalsit doygunluğu için gereken, yeterli yüksek CO_2 kısmi basıncını muhafaza etmek için belli miktarda CO_2 teminine ihtiyaç vardır. Herhangi bir sıcaklıkta sıvı çözelti içindeki CaCO_3 minerallerinin çözünürlüğü CO_2 'nin artan kısmi basıncı ile artar (Şekil 2). CO_2 gazındaki azalma pH değeri ve CO_3^{2-} iyon konsantrasyonunda artışa neden olur. Özellikle CO_3^{2-} konsantrasyonundaki artış, başlangıçta kalsitle doymuş jeotermal suyu, kaynama vasıtasıyla, aşırı doymun hale getirir. Ancak Ca taşıyan iyon çiftçileri, özellikle CaSO_4 , su sıcaklığı azaldıkça aşırı doymunluğa katkı yapar.



Şekil 2. 100 °C deki CaCO_3 - CO_2 - H_2O içinde basıncın fonksiyonu olarak CaCO_3 çözünürlüğü [18].

Silika içerikli kabuklaşma düşük ve orta sıcaklıktaki sularda yaygın değildir. Silika, sızdıran bağlantı ve ek yerleri nedeniyle evyelerde ve küvetlerde çökebilir ve kirlenmelere neden olur. Bunun sebebi buharlaşan suyun geride bıraktığı minerallerdir. Tatlı veya yumuşak suların jeotermal suyla karışması magnezyum silikat kabuklaşmasına neden olabilir. Tatlı sularda Mg konsantrasyonu jeotermal sulardan fazladır. Magnezyum silikat çözünürlüğünün sıcaklıkla ters ilişki içinde olması nedeniyle tatlı sular ısıtıldığında çökme riski artar. Sıcaklık, havadan arınma derecesi pH ile birlikte doymunluğun kontrol eden faktörlerdir.

2.1.2. Kalsit ve Aragonit Kabuklaşmasının Tahmini

Kalsit, aragonit ve vaterit şeklinde üç allotropu olan kalsiyum karbonat, düşük ve orta sıcaklık suları kullanan jeotermal üretim sistemlerinde en yaygın kabuk türüdür. Potansiyel kabuk probleminin var olduğu durumlarda bunun boyutlarının tahmin edilmesi arzu edilir. Çıkarılan suyun analizi sistemde

beklenenler hakkında ipuçları verir. Jeotermal suların kabuklaşma problemini tahmin için çeşitli matematik yaklaşımlar vardır. WATCH ve SOLVEQ jeotermal sıvıların kimyasal bileşimini yorumlayan programlardan ikisidir [9]. Bu iki program yüzeyde toplanan su, gaz ve yoğunlaşmış buharın kimyasal analizlerinden, derin akifer sıvıların kimyasal bileşimini hesaplar. Program çıktıları pH, gazların kısmi basıncı, minerallerin çözünme reaksiyonları için redox potansiyelleri ve çözünürlük çarpımıdır. Eğer sıvının kimyasal bileşimi bilinirse, WATCH veya SOLVEQ programlarını kullanarak doygunluk indeksi veya aktivite sabitini bulmak kolaydır. Kabuk oluşumunu tahmin etmek için kullanılan doygunluk indeksi ifadesi [9]:

$$SI = \log (Q/K) \quad (5)$$

Mineral çökeltme veya çözünme eğilimi, denge sabiti (veya teorik çözünürlük çarpımı) K'nin, çözelti içindeki ilgili mineral çeşitlerinin aktivitelerinin bölümü olan, altta verilen Q fonksiyonu ile karşılaştırılması ile belirlenir. Log Q ve Log K WATCH ve SOLVEQ programlarıyla hesaplanır. Herhangi bir m minerali için Q_m değeri

$$Q_m = \prod \frac{a_{i,m}^{v_{i,m}}}{a_m} \quad (6)$$

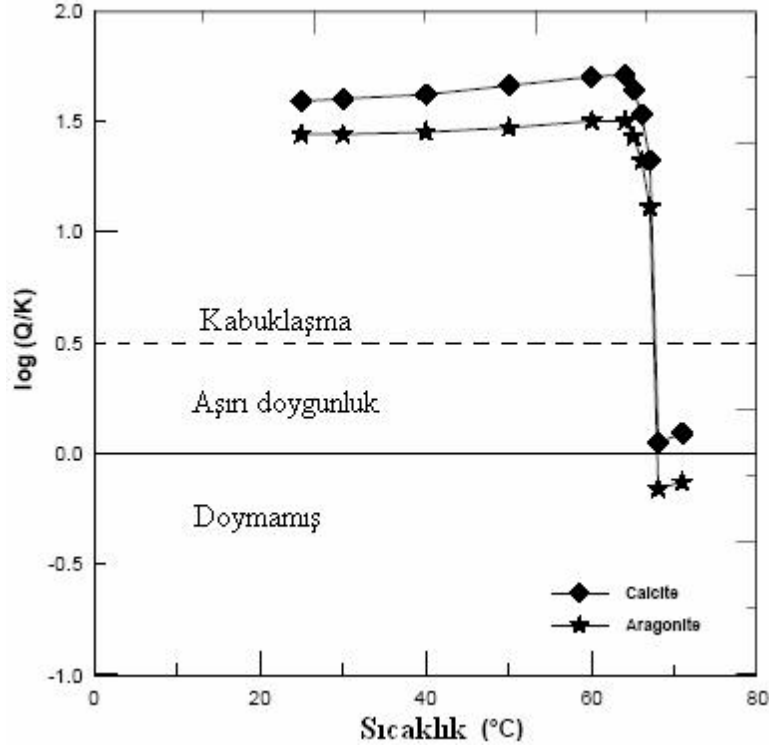
şeklinde yazılabilir (10). Eşitlik 6'nın çıkarılışında mineralin reaksiyon eşitliğinin sol tarafında, sıvı bileşenlerinin sağ tarafında bulunduğu göz önüne alınmıştır. Bu durumda $a_{i,m}$ aktiviteyi (saf minerallerde $a_m = 1$ dir), $v_{i,m}$ m minerali içindeki bir iyonun stokiometrik katsayısını ifade eder. Termodinamik modellerde $CaCO_3$ çözünmesini hesaplamada kullanılan metot için alttaki reaksiyon esas alınır:



CO_3^{-2} ve HCO_3^- iyonlarının sıvı CO_2 ile dengede olduğu kabul edilirse, 7 reaksiyonu 3 reaksiyonunun yerini alabilir. Zaman içinde jeotermal sudaki değişimler, farklı zamanlarda alınan su örneklerinde mineral dengesindeki değişimleri karşılaştırarak açık şekilde görülebilir.

Log Q/K değerlerini hesaplamak ve sıcaklığa göre bunları grafiğe geçirmek su kimyasını kontrol eden değişik mineraller için yaygın bir uygulamadır (9). $Q < K$ iken doygunluk indeksi negatiftir ve çözelti söz konusu minerale göre doygunluk sınırı altındadır. $Q > K$ iken çözelti aşırı doygunluktur. $Q = K$ iken çözelti tam doygundur ve ilgili mineralle dengededir (Şekil 3). Eğer su dengede ise eğrilerin çoğunluğu doygunluk çizgisini (Log Q/K = 0) yaklaşık aynı sıcaklıkta keser.

Log Q/K hesaplanarak kabuklaşma potansiyeli tahmin edilebilir. Bir mineralin göreceli log çözünürlüğünün pozitif değeri çözeltinin bu minerale göre aşırı doygun olduğunu gösterir ve bu mineral çökebilir. Şimdiye kadar kazanılan deneyimler, doygunluğa erişir erişmez çökeltmenin normal olarak başlamayacağını, örneğin İzlanda'daki düşük sıcaklık jeotermal sularında Log Q/K değeri 0.3-0,5'e erişinceye kadar çökeltmenin başlamadığını göstermiştir.



Şekil 3. Sıcaklığın fonksiyonu olarak kalsit ve aragonitin doygunluk endeksi, $\log(Q/K)$ [9].

2.1.3. Kalsit ve Aragonit Kabuklaşmanın Önlenmesi

Jeotermal tesislerde etkili bir kabuk önleme işlemi, projenin başarısında anahtar rolü oynar. Ancak kabuk önleme metodu veya uygun bir kabuk temizleme işlemi proje bölgesinin özel şartlarına bağlı olduğundan her şarta uygun bir metot geliştirmek mümkün değildir. Kalsiyum karbonat kabuklaşması alttaki işlemlerle engellenebilir:

- Sıvıyı basınç altında tutarak gaz kaçışlarını engellemek,
- pH ve CO_2 nin kısmi basınçlarını kontrol ederek karbonat-bikarbonat dengesini kontrol etmek,
- Kabuklaşmayı engelleyen kimyasallar ilave etmek,
- Sıvıyı basınç altında soğutmak,
- Koruyucu kaplamalar kullanmak

Jeotermal akışkanın basınç ve sıcaklığının kontrolü, akışkanın doğal akışına bağlı kalmak yerine, üretimin pompa ile yapılmasıyla da sağlanabilir. Kuyu içine, iki fazlı akış bölgesinin altına indirilen pompa ile akışkan basınçlandırılarak buharlaşmasına izin verilmeksizin yüzeye ulaştırabilir. Böylece kabuklaşma önemli ölçüde kontrol altına alınabilir. Kabuklaşmayı önlemenin başka bir yolu karbondioksitin kısmi basıncını yapay olarak yüksek tutmaktır. Bunun için elde edilen karbondioksitin bir kısmını üretim kuyusuna geri enjekte etmek gerekir. Ancak bu metodun düşük CO_2 kısmi basınçlarında etkili olduğu bulunmuştur.

Jeotermal akışkanın kimyasal bileşiminin kontrolü, özellikle pH değeri kabuklaşmayı engellemenin başka bir yoludur. pH değerini kalsit kabuklaşmasının teknik olarak mümkün olmadığı seviyeye indirmek, jeotermal akışkana HCl ilave ederek sağlansa da, pahalı bir işlemdir.

Kabuk engelleyicilerinin (inhibitörler) kullanımı kabuklaşma problemleri ile başa çıkmada en yaygın ve yararlı bir metottür. Asıl problem pazara sunulan çok çeşitli kimyasallar arasından en uygun olanını seçmektir. Söz konusu bir suda en iyi engelleyiciyi seçmek için, o ortamda kullanılması düşünülen metalik malzemelerle korozyon testleri (ağırlık kazanımı, korozyon hızı akım yoğunluğunun ölçümü gibi) yapmak, kullanılacak kimyasalların miktarının tespit edilmesi için gerekecektir.

3.KOROZYON

Metalik parça, sistem veya tesislerin çevre şartlarının kimyasal veya elektrokimyasal etkisi altında tahrip olması hadisesidir. Demir ve alaşımsız adi karbon çeliklerinin kolayca çeşitli ortamlarda korozyona uğrayıp, paslandığı bilinmektedir. Korozyonun en yaygın olanı sulu korozyon olup çok çeşitli şartlarda meydana gelir [12].

Jeotermal akışkanların metaller üzerindeki etkisi onların çok çeşitli olan kimyasal bileşimine bağlıdır. Kükürt ve halojen asitleri ihtiva eden ve çok yaygın alaşımları aktif olarak korozyona uğratan kuvvetli asidik sulardan başlayıp, kalsit ve metal oksitten esaslı koruyucu tabakalar oluşturan pH değeri nötr olan daha alışılmış sulara kadar çok çeşitli jeotermal akışkan vardır.

Jeotermal akışkanların oksijenle kirletilmesi çoğu alaşımların korozyonunu aşırı şekilde artırır. Çözünmüş gazların yok olması korozyon açısından genellikle yararlıdır, çünkü CO₂ kaybı çoğu jeotermal sularda pH değerini yükseltir. Çeliklerin korozyonu pH arttıkça azalır. Atmosferle temasa gelen jeotermal sularda havadaki gazlar çözünebilir (Soğutma kulelerinde olduğu gibi). Korozyon açısından etkili olanı oksijendir. Sıcaklık 100°C ye yükseldikçe oksijenin çözünürlüğü minimuma düşse de, oksijeni jeotermal sulardan uzak tutmak çok önemlidir.

3.1 Korozyon Tipleri

Jeotermal tesis ve ekipmanlarında korozyonun tüm çeşitlerine rastlanabilir. Bunların özelliklerine kısaca değinmekte yarar vardır.

Tekdüze veya genel korozyon, tüm yüzeyin homojen olarak pasla dönüştüğü bir tiptir. Klor ve hidrojen iyonlarınca teşvik edilir. Tehlikeli olmayıp, birkaç basit testle cihazın ömrü belirlenebilir.

Oyulma, metal yüzeyinde çukurcukların meydana geldiği bölgesel bir korozyon tipidir. Metalik yüzeydeki pasif film veya yüzey kabuğunun bozulması ile ilgilidir. Yüksek konsantrasyonlardaki klor ve hidrojen iyonları çoğu metallerin çözünmesini teşvik eder. Oyulma korozyonunun başlaması için metalin çözünme hızının belli bir noktada anlık olarak yükselmesi gerekir. Oyulma direncine etki eden birçok faktör arasında bazı önemli tespitler yapılabilir: 12'nin üzerindeki pH değerinde paslanmaz çelikler göreceli olarak korozyon riski taşımazlar. Deneysel bulgular klasik 18/8 paslanmaz çeliğin 4<pH<8 arasındaki %4 NaCl içinde en ağır oyulma korozyonuna uğradığını göstermiştir. Çukurcuk oluşumu anında metalin anodik çözünmesi oksijenin OH⁻ iyonlarına dönüşmesini sağlayan katodik reaksiyonla dengelenir. Başka bir ifade ile sıvı içinde O₂ varlığı oyuncuk oluşumu için temel koşuldur. Genel korozyona karşı pasifleştirici özellikte olan oksijen, klor içeren ortamlarda doğrudan hasar sebebidir. Oksijen katodik polarizasyonu engellediği için (dipolarizasyon) korozyon şiddetini artırır. Oyulma, tüm elektrokimyasal korozyonlar gibi, sıcaklık artışı ile hızlanır. Ancak atmosferik basınçta 80 °C üzerindeki sıcaklık artışı sulu ortamlardaki oksijen çözünürlüğünün azalmasından dolayı oyulma şiddetinin azalmasında ikincil bir etkiye sahiptir. Ancak basınç altındaki sistemlerde bu geçerli değildir.

Aralık korozyonu, bölgesel olma özelliği ile oyulma korozyonuna benzer. Araç ve gereçlerdeki aralıklarda, kabukların altında meydana gelir. Metal ve metal olmayan yüzeylerin temas ara yüzeyleri metalin aralık korozyonunu teşvik eder. Korozyon ürünü ve kabukların yüzeyde çökmesi aralık korozyonu meydana getirebilir. Korozyon geliştikçe aralık içindeki oksijen katodik reaksiyonla tüketilirken, Cl^- ve H^+ iyonları demirin anodik çözünmesini hızlandırır.

Gerilme korozyonu çatlaması (GKÇ), klor gibi özel iyonların varlığında çekme gerilmesinin sinercik etkisi ile teşvik edilen bir hasar türüdür. Oksijen varlığı ve artan sıcaklık saldırının şiddetini artırır. Bu jeotermal çevrelerde en tehlikeli korozyon türüdür. GKÇ yaratan en yaygın ajanlar (kimyasallar) H_2S ve Cl^- iyonudur. Yüksek miktarlarda H_2S içeren sıvı çözeltiler, özellikle pH<4'ün altında, 18/8 paslanmaz çeliğinin GKÇ ye uğramasına sebep olurlar. Genellikle düşük sıcaklıklarda meydana gelen bu korozyon tane içi (transcrystalline) şeklindedir. Yüksek sıcaklıklarda H_2S 'in sudaki çözünürlüğü açık sistemlerde azalır. Basınç altındaki kapalı bir sistemde, örneğin 120 °C de, bu tip hasara olan hassasiyet azalıyor. Bu çelişkili gibi görünen sonuç, çelik yüzeyinde meydana gelen koruyucu sülfür filmlerine bağlı olarak açıklanmaktadır.

Kükürtlü gerilme çatlaması (SSC- Sulfide Stres Cracking) sıvı fazda bulunan H_2S ortamı ve çekme gerilmelerinin etkisiyle meydana gelen bir korozyondur. Düşük pH malzeme hasarını hızlandırır. Yüzeyde hidrojen kabarcıklarının oluşumu (blistering) H_2S li sulara maruz düşük mukavemetli çeliklerde meydana gelen benzer bir korozyon hasarıdır. SSC'nin şiddeti artan sıcaklıkta azalır.

Jeotermal sistemlerde daha az önemi olan korozyonlar arasında galvanik korozyon, korozyonlu yorulma ve kabuklaşma sayılabilir.

3.2 Ana Korozyon Yapıcılar

Jeotermal sularda karşılaşılan iki teknik problemden birisi kabuklaşma, diğeri korozyondur. Silika, kalsit ve bazen de sülfür en önemli kabuklardır. Korozyon ürünleri ikinci bir kabuk oluşturma kaynağıdır. Kaynağı nereden gelirse gelsin kabuklar ısı iletimi ve pompalama verimi üzerindeki negatif etkileri nedeniyle önemlidir.

Korozyon bağlamında jeotermal suda önemli olan korozyon yapıcılar hidrojen iyonu, klor iyonu, hidrojen sülfür, karbon dioksit, oksijen ve demirdir. Bunların etkisi özet olarak Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Korozyon yapıcı elemanlar ve etkileri.

Korozyon Yapıcı	Etkisi
Oksijen	50 ppb üzeri oyulma yapar
pH	pH ≥8 olursa korozyon hızı azalır
CO ₃	pH değerini düşürür, korozyonu artırır
H ₂ S	Katodik polarizasyonu engeller, GKÇ' yi artırır
Sıcaklık	Artışı hasarı hızlandırır
Cl^- iyonu	GKÇ' yi ve genel korozyonu teşvik eder

Hidrojen İyonu: Çoğu metallerin korozyonu pH düştükçe artar. Hidrojen iyon konsantrasyonu arttıkça (düşük pH) çeliklerin GKÇ hassasiyeti artar. Ana korozyon tipleri oyulma, aralık ve GKÇ'dir. Kuyu sularında pH önemli özelliktir. Ph <6,5 ve yüksek CO₂ konsantrasyonuna (örneğin 20 mg/l) sahip sularla temasa gelen demir ve çelikte hidrojen çıkışı ile asidik korozyon meydana gelir. pH > 8 olan sularda genel korozyondan çok bölgesel oyulma meydana gelir. Bu durum özellikle sudaki çözülmüş oksijenle artar. Buna benzer sularda kuyu parçaları karbonat çökmesi ile kabuklaşırlar.

Suyun pH değeri azaldıkça kuyu konstrüksiyonundaki demir bazlı malzemeler daha çok korozyon riskine maruz kalırlar.

Klor İyonları : Pasif filmi bölgesel olarak tahrip eder. Artan klor iyon konsantrasyonu ile genel korozyon da artar, ancak bu bölgesel korozyon kadar tehlikeli değildir. 50°C den yüksek sıcaklıklarda 5-10 ppm klor iyonunun, ortamda çözülmüş oksijen bulunması halinde, paslanmaz çeliklerde GKÇ' yi teşvik ettiği bilinmektedir. Yüksek klor konsantrasyonu, Fe⁺³ iyonları ile çözünlülüğü yüksek karmaşık yapılar oluşturduğu için, jeotermal sularda demirin çözünmesini hızlandırır.

Hidrojen Sülfür : Bunun en şiddetli etkisi Cu ve Ni alaşımlarının korozyonunda görülür. H₂S'in demir bileşikleri üzerindeki etkisini tahmin etmek zordur. Bazı durumlarda saldırı hızı artarken, diğerlerinde korunma söz konusu olabilir. Yüksek mukavemetli çelikler sülfür gerilme çatlamasına maruz kalabilir. Havalanmış jeotermal üretim kanallarında hidrojen sülfürün oksitlenmesi akışkanın asitliğini artırır. Milyonda ve milyarda birkaç mertebelerinde H₂S jeotermal sularda her zaman vardır. Oksijen de varsa, düşük konsantrasyonlarda bile ciddi tahrip etkisi vardır. Demirin atomla çözünmesi, H₂S ise katotta hidrosülfür ve sülfür iyonlarına ayrışması ile demirin jeotermal sularda genel korozyona uğraması söz konusudur. Saldırının eşik konsantrasyonu milyar da otuz (30 ppb) mertebesinde. Jeotermal sulardaki H₂S varlığı, demirin varlığı gibi, demiri çözen indirgen bir suyun göstergesidir. Buna ilave olarak, yeterli H₂S konsantrasyonunun varlığı, bunun metalle doğrudan reaksiyona girip, ikincil korozyon hücresi geliştirerek, demir ve çeliğin ciddi korozyonuna sebep olabilir. Düşük sıcaklık sularında H₂S bulunduğu kükürt indirgeyici bakterilerin varlığından (sulphide reducing bacteria) şüphe edilebilir. Bu bakteriler genel sülfür saldırısına ek olarak devamlı bir bölgesel oyulmaya sebep olabilirler. 0.5 ppm veya üzerindeki H₂S konsantrasyonları belli Cu alaşımlarında tahribat yapabilir.

Karbon Dioksit. Artan çelik korozyonuna sebep olan hafif oksitleyici bir maddedir. Ancak jeotermal sulardaki CO₂ nin birincil etkisi karbonat türleri ve pH değişimi ile ilgilidir. Asidik çözeltilerdeki CO₂ karbon çeliklerinin genel korozyonunu artırabilir. Diğer yandan karbonatlar ve bikarbonatların koruyucu etkisi vardır. CO₂ ve NaCl nin varlığının 80°C ye kadarki jeotermal sularda çok yüksek bir korozyon hızına sebep olacağı teorik olarak gösterilebilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise korozyon hızını tahmin edilen değerlerin altına düşüren karbonat filmleri oluşur. Karbonik asidin ise bikarbonat ve hidrojen iyonları veren alternatif katodik yarım hücreler yarattığına inanılır.

Oksijen: Çoğu jeotermal sularda düşük konsantrasyonlarda bulunur. Bu gazın istemeden ve dikkatsizce eser miktarda da olsa jeotermal sulara girişi korozyonu şiddetlendirir. Oksijen ve klorun aynı anda bulunuşu GKÇ ye bağlı hasara sebep olabilir. Jeotermal sulara az miktarda oksijen ilavesi, normal halde dirençli olan metallerde aralık korozyon şansını ciddi olarak artırır. Karbon çeliklerinin korozyonu eser miktarlardaki oksijene karşı hassastır. Düşük konsantrasyondaki H₂S ile havadan çözülmüş oksijen düşük sıcaklıktaki jeotermal sularda dakikalarca devamlı kalabilir. Bunun nedeni düşük reaksiyon kinetiğidir.

Oksijen kirlenmesini engellemek oldukça zordur, suyu taşımak için özellikle kuyu dibine daldırılanlardan başka pompalar kullanılırsa, jeotermal su yeniden geri basım (reenjeksiyon) sırasında hava ile temasa gelebilir veya oksijen jeotermal suyun içinde bulunan doğal bileşiklerden biri olabilir. Suyun havalanması genel korozyonu 10 katı ve üzerine çıkarabilir. Klor iyonları ile beraber belli sıcaklıklarda GKÇ başlatabilir. Geri basım anında, özellikle suyun geri basım kuyusuna akarken sıcaklığın artabileceği noktalarda oksijen kirlenmesini engellemek çok önemlidir. Havalandırılmış sudaki çeliğin korozyonu, demir oksit kaplı bir yüzey üzerinde çözülmüş oksijenin indirgenmesi ve yüzeydeki emiş altında demirin çözünmesi ile kontrol edilebilir. Sıcak sudaki birkaç ppm oksijen bölgesel korozyon için yeterlidir. Düşük oksijen seviyelerindeki korozyon ürünü esas olarak demir sülfürlerdir (pirit, pirotit). Oksijen seviyesi arttıkça manyetit ana ürün haline gelir.

Çözülmüş Demir : Kuyu deşarjlarındaki koyu kahverengi-kırmızısı demir oksit lekeleri, havasız (anaerobik) kuyu sularının belirtisidir. Başka bir ifade ile akifer kayalarından çelik kuyu parçalarından demiri çözebilen indirgeyici bir ortamı ifade eder. Bu korozif gücüne ek olarak böyle bir su, havalanma ile oksijen almış veya farklı kalitedeki suların karıştığı sistemlerde parçaları üzerinde problemler demir çökeltmelerine sebep olabilir. pH ve redox potansiyeli, demir kararlılık (stability) diyagramı üzerinde gösterilirse, suyun korozyon kapasitesi veya demir yüzeyini koruma gücü ile ilgili bilgiler elde edilebilir.

Eğer jeotermal su parametreleri diyagramın ferros demir bölgesine düşerse suyun demiri çözmesi beklenir. Eğer ferrik bölgede olursa oksitlenme ürünleri ile pasifleşme sonucu korozyon önlenecek ve kabuklaşma meydana gelecektir.

Su sıcaklığı ile ilgili şunlar söylenebilir: Yüksek CO₂ miktarına ve düşük pH değerine sahip sularda sıcaklık artışı hasar sebebi olabilir. Sıcaklıktaki her 10°C artışta hidrojen çıkış reaksiyonu ikiye katlanır. Bu sebeple 35°C deki su 25°C dekine göre iki kat daha tahrip edicidir. Daha yüksek sıcaklıklarda bu etki çok daha şiddetlidir.

Kabuk çökmesi metal korozyonunu etkiler. CaCO₃ kabuğu bazen kasıtlı olarak çöktürülerek korozyona karşı koruma sağlanır. Ama çoğu durumlarda kabuk çökmesi korozyonu hızlandırır. Özellikle Demir sülfür kabuklaşması ciddi problem yaratır. Demir sülfür demire göre katodiktir. Bu da ciddi oyulma korozyonu yaratan galvanik hücreler oluşturur. H₂S, O₂ veya CO₂ gibi gazlar ihtiva eden sularda her tür çökmenin varlığı olası korozyon probleminin şiddetini artırır.

4.KABUKLAŞMA VE KOROZYONA KARŞI BORU İÇ YÜZEYLERİNİN KAPLANMASI

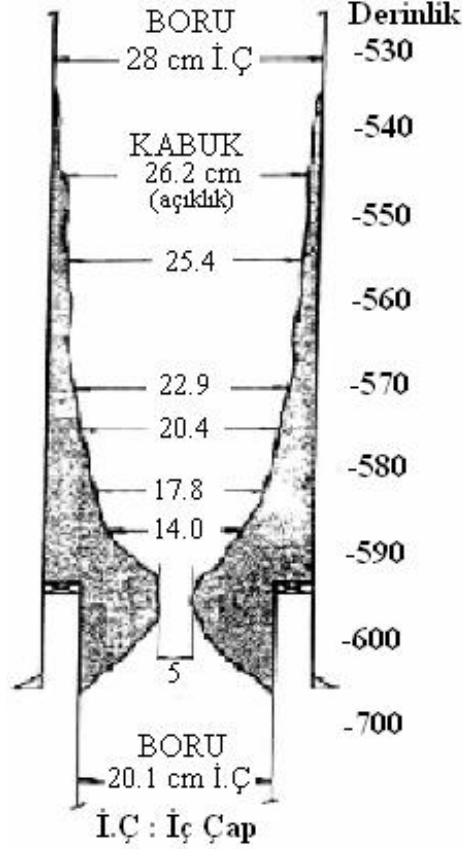
Jeotermal sıvıların kullanımında metalik yüzeylerin korozyonu ve kabuklaşması iki önemli sorun olarak ortaya çıkmaya devam etmektedir. Bilindiği gibi korozyonun kinetiği ve mekanizması çevrenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine olduğu kadar seçilen konstrüksiyon malzemesine de bağlıdır. Jeotermal sıvıların yükseltgenme ve indirgenme durumlarını belirleyerek korozyon ve kabuklaşma işlemlerinin modellenmesi konusunda yapılan çalışmalar istenilen sonuçları vermemiştir [5]. Jeotermal sistemlerde korozyon ve kabuklaşmayı kontrol etmek için test edilen değişik metotlar arasında inhibitörler kullanmak, pH ve CO₂ nin kısmi basınçlarını kontrol ederek karbonat-bikarbonat dengesini kontrol etmek ve periyodik temizleme sayılabilir [13].

Kullanılan çeşitli boya kaplamalar içinde Epoxy boyalar daha iyi sonuç vermiş, fakat ömürleri yetersiz bulunmuştur. Silikon boyaların 200°C de daha iyi sonuç verdiği bulunmuştur. Çok yüksek veya düşük pH değerine sahip ciddi koşullarda, uyguladığı kurban anot mekanizması nedeniyle, çinko silikat boyanın çelikleri koruduğu rapor edilmiştir [14].

Jeotermal sıvı benzeri çözeltilerde adi karbon çeliğin korozyonu, çeşitli organik kaplamaların sağladığı koruma performansını test etmek için araştırılmış [13]. Bu çalışmada kromat pigmentli iki bileşenli akrilik primerin kullanıldığı çift bileşenli epoksi sistem (AC/E) ile tanin takviyeli, su bazlı akrilik primerin çift bileşenli epoksi boylarla birlikte kullanıldığı (WT/E) sistemin 20,40,60°C test sıcaklıklarında en mükemmel koruma sağladığı, bu sıcaklıklarda yapılan uzun süreli ağırlık kaybı hesaplamalarından anlaşılmıştır. AC/E ve WT/E boya kombinasyonlarının korozyon hızını çıplak çeliğe göre %81-92 oranında azalttığı gravimetrik olarak ölçülen korozyon hızlarından anlaşılmıştır. Başarılı bulunan her iki kombinasyonda da en son kat E, iki bileşenli bir epoksi sistemden oluşuyor. AC/E kombinasyonu daha başarılı olmasına rağmen, çift bileşenli akrilik primer AC'nin çevre için zararlı olan kromat iyonları içermesi nedeniyle, tercih sebebinin daha çok çevre ve teknik faktörlere bağlı olduğu ifade edilmiştir.

Boru içi yüzeyinde oluşan kabukların basınçlı su uygulanması ile temizlenmesi her zaman mümkün görülmemektedir. Bu işlemin başarısı sadece yüzeyde oluşan kabukların türüne değil, boru yüzeyi ile üzerinde oluşan kabuk ara yüzeyinde kuvvetli bağ oluşturan bir reaksiyonun oluşmaması, başka bir ifade ile boru içi yüzeyinde kullanılan kaplamanın kimyasal olarak inert olması ve kabukla reaksiyona girmemesine bağlıdır. İç yüzeyleri SiC ile doyummuş iletken polimer astarla kaplı, ısı değiştirgeçlerinde de kullanılan karbon çelik boruların jeotermal enerji santrallerinde korozyon koruyucu olarak kullanılabileceği, ancak bu tür bir astar kaplamanın jeotermal suda bulunan kimyasallara karşı aktif olmaması gereği ifade edilmiştir [15]. Jeotermal sudaki Ba⁺² iyonlarının kompleks karboksilat tuzları oluşturularak, astar kabuk arasında kuvvetli bir bağ oluşturduğu bulunmuştur. Bu çalışma Vinyle tipinde monomerlerle (styrene, trimethylolpropare trimethacrylate-TMPTMA ve methyl methacrylate-MMA) gerçekleştirilmiştir. Benzeri bir çalışma [16] poly (phenylenesulfide) (PPS) içine, çalışan koşullarına

cevap verecek özellikleri sağlamak üzere, ilave edilen katkı maddeleri ile yeni kaplama sistemleri geliştirmek için yapılmıştır. Jeotermal enerji santrallerinde kullanılan karbon çeliği bu değiştirgeçlerin ömrünü artırmak için geliştirilmiş bu kaplama sistemlerinden şu özellikler beklenir: (1) iyi termal iletkenlik, (2) korozyon ve oksitlenmeye karşı çelik tüplerin korunması, (3) kabuklaşma karşıtı (anti-fouling) özellikler ve (4) abrasive (kazıma) aşınmasına karşı direnç. Bu özellikleri karşılamak üzere; termal iletkenlik için PPS içine SiC ilavesi, korozyon ve oksitlenmeye karşı kristal yapılı çinko fosfat seramik ile çelik yüzeyinin ilk kat (primer) kaplaması, kabuklaşmayı azaltmak için PTFE ile karıştırılmış PPS nin son kat kaplaması ve PPS içine alüminyum oksitçe zengin kalsiyum aluminatın (ACA) karıştırılması gerçekleştirilmiştir. PPS içine konulan bu ilavelerle ucuz karbon çeliğinden ısı değiştirgeçlerinin jeotermal enerji santrallerinde kullanılabilmesi mümkün hale gelmiştir.



Şekil 4. Kesit artışına bağlı basınç düşüşü nedeniyle meydana gelen kaynamanın sebep olduğu kabuklaşma [17]

Boru içi yüzeyinde oluşan kabukların basınçlı su uygulanması ile temizlenmesi her zaman mümkün görülmemektedir. Bu işlemin başarısı sadece yüzeyde oluşan kabukların türüne değil, boru yüzeyi ile üzerinde oluşan kabuk ara yüzeyinde kuvvetli bağ oluşturan bir reaksiyonun oluşmaması, başka bir ifade ile boru içi yüzeyinde kullanılan kaplamanın kimyasal olarak inert olması ve kabukla reaksiyona girmemesine bağlıdır. İç yüzeyleri SiC ile doyummuş iletken polimer astarla kaplı, ısı değiştirgeçlerinde de kullanılan karbon çelik boruların jeotermal enerji santrallerinde korozyon koruyucu olarak kullanılabileceği, ancak bu tür bir astar kaplamanın jeotermal suda bulunan kimyasallara karşı aktif olmaması gereği ifade edilmiştir [15]. Jeotermal sudaki Ba^{+2} iyonlarının kompleks karboksilat tuzları oluşturarak, astar kabuk arasında kuvvetli bir bağ oluşturduğu bulunmuştur. Bu çalışma Vinyle tipinde monomerlerle (styrene, trimethylolpropare trimethacrylate-TMPTMA ve methyl methacrylate-MMA) gerçekleştirilmiştir. Benzeri bir çalışma [16] poly (phenylenesulfide) (PPS) içine, çalışan koşullarına cevap verecek özellikleri sağlamak üzere, ilave edilen katkı maddeleri ile yeni kaplama sistemleri geliştirmek için yapılmıştır. Jeotermal enerji santrallerinde kullanılan karbon çeliği bu değiştirgeçlerin ömrünü artırmak için geliştirilmiş bu kaplama sistemlerinden şu özellikler beklenir: (1) iyi termal iletkenlik, (2) korozyon ve oksitlenmeye karşı çelik tüplerin korunması, (3) kabuklaşma karşıtı (anti-

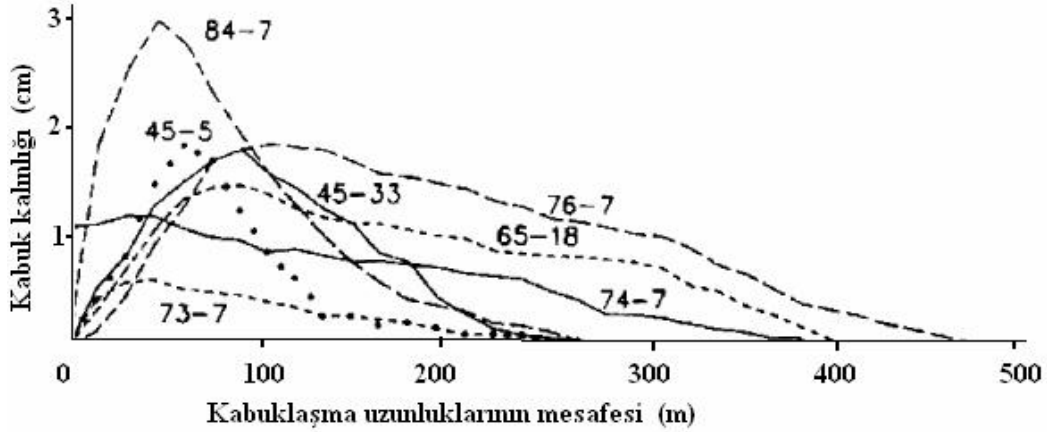
fouling) özellikler ve (4) abrasive (kazıma) aşınmasına karşı direnç. Bu özellikleri karşılamak üzere; termal iletkenlik için PPS içine SiC ilavesi, korozyon ve oksitlenmeye karşı kristal yapılı çinko fosfat seramik ile çelik yüzeyinin ilk kat (primer) kaplaması, kabuklaşmayı azaltmak için PTFE ile karıştırılmış PPS nin son kat kaplaması ve PPS içine alüminyum oksitçe zengin kalsiyum aluminatın (ACA) karıştırılması gerçekleştirilmiştir. PPS içine konulan bu ilavelerle ucuz karbon çeliğinden ısı değiştirgeçlerinin jeotermal enerji santrallerinde kullanılabilmesi mümkün hale gelmiştir.

Karmaşık bir işlem olan kabuklaşmanın kuyu boyunca tanımlanması ve modellenmesi ticari ve ekonomik nedenlerle oldukça önemlidir. Kabuklaşmanın tahmin edilmesi, şekli ve yerinin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [17, 18]. Jeotermal çözeltilerde kabuklaşma ve korozyon özelliklerini tanımlamada yararlı olan Langelier ve Ryzner doygunluk indekslerini belirleyen bilgisayar programı yapılmış ve bunun için Davies ve Ditzer aktivite hesaplamaları kullanılmıştır [17]. GEOPROF adı altında geliştirilen bu program kullanılarak kuyularda ilk kaynama derinliği ve bu nokta ile kuyu başlığı arasında CO₂, CH₄ Ve N₂ gazlarının kısmi basınç profilleri bulunmuştur. Karbonat minerallerinin çözünürlüğü pH değeri ve sularda çözünmüş CO₂ gazının kısmi basıncından etkilendiği için özellikle CO₂ kısmi basıncının azalması, kabuklaşma oluşumunu hızlandıracaktır [9]. Yüzey koşullarında artan kabuklaşma şiddetini azaltmak için, jeotermal tesislerdeki üretimde kuyubaşı basıncının flashing point basıncının altına düşmesine izin verilmemelidir. Kuyuların derinliklerinden yüze doğru artan pH değeri, özellikle yüzeyde atmosferik basınçta meydana gelmesi halinde, kabuklaşma 225 ton/h üretimde 109.8 kg/h CaCO₃ çökmesine neden olabildiği belirtilmektedir [17]. Atmosfer basınç şartlarında hesaplanan bu kabuklaşmanın, basınç düşüşüne bağlı kaynamanın meydana geldiği noktadan itibaren 100 metre yukarıdaki boru boyunca, aynı miktardaki su üretimi için, meydana gelen ortalama 1 cm kalınlığındaki kabuk tabakası ile karşılaştırıldığında oldukça fazla olduğu görülür. Bu nedendir ki kuyu çıkış noktasındaki basıncın aşırı düşmesine engel olunmalıdır. Kabuklaşma, özellikle kaynamaya bağlı olarak sudaki CO₂ basıncının azalması nedeniyle, kaynama noktasının üst kısmında yoğunlaşır [Şekil 4].

Kuyularda kabuklaşma üzerinde yapılan çalışmalarda [19,20] boru kesitinde %45 lere varan kesit daralması olduğu, ancak bunun kuyu çıkışında akış problemi yaratmadığı ifade edilmiştir. Kuyu çıkışındaki basınç düşüşüne bağlı olarak 0-300 metre arasında yer değiştiren kaynama (veya köpürme) noktasının kuyu borularındaki kabuklaşma için başlangıç noktası olduğu ve kesit değişme noktalarının için kritik nokta oluşturduğu dikkat çekmektedir.

Kaynama derinliğinin kısa ve değişken olmadığı yerlerde kalın, fakat kısa mesafeli kabuklar oluşurken, değişken kaynama noktalarında ve yüksek akış hızlarında daha ince kabukların uzun mesafelere yayıldığı gözlenmiştir(20). Kuyu çıkış basıncındaki değişme genellikle kabuklaşma boyunu belirler. Kaynama dar kesitli borulara kayacak olursa daha hızlı kabuklaşma nedeniyle temizlemenin sık yapılması gerekir, temizleme genellikle %65–70 kesit daralmalarının ardından yapılmalıdır. Boru kesitleri ne kadar büyük olursa temizleme periyotları da o kadar uzun olur. Kaynama noktasına göre kabuklaşma uzunlukları ve kabuk kalınlıkları [Şekil 5] de verilmiştir.

Jeotermal kuyulardaki korozyon probleminin sadece metalik konstrüksiyon elemanları ile sınırlı kalmadığı, derin kuyu çimentolarının da kireçleşme (calcification) işlemi denen, betonun kireçleşerek mukavemetinin kaybolmasına neden olan bir işleme maruz kaldığı görülmüştür. Sodyum polyfosfat ile modifiye edilmiş uçucu kül – kalsiyum aluminat (SFCB) karışımı bir çimento geliştirilerek, derinliği 1680 m, dip sıcaklığı 280 °C ve CO₂ konsantrasyonu 10000 ppm olan derin kuyuda başarı ile uygulanmıştır [21]. SFCB kuyu çimentolarını karbonatlaşma ve asit korozyonuna karşı geliştirmek üzere yapılan bir çalışmada [22], 90 °C civarındaki akifer su yüzeyinde pH değerinin <2 olduğu durumlarda CaO/Al₂O₃ oranı 0.4 olan ve içinde iki temel faz olarak monokalsiyum aluminat (CA) ve kalsiyum bi-aluminat (CA₂) bulunan kalsiyum aluminat çimentosunun (CAC) istenen özellikleri en iyi sağladığı bulunmuştur. (CA) ve (CA₂) nin karbonatlaşarak meydana getirdiği kalsit



Şekil 5. Yedi ayrı kuyuda kabuklaşma profilleri [17].

H_2SO_4 ile reaksiyona girip, beton yüzeyinde bir korozyon ürünü olan alçı-jel kabuğu oluşturmuştur. Bu oluşumun beton çevresindeki ortamı nötr hale getirerek çimentoyu ileri asit korozyonundan koruduğu, bununla da kalmayarak sodyum polyfosfatın (NaP), (CA), (CA₂) ve uçucu kül ile reaksiyonunu teşvik ederek hidroksiapatit, böhmite ve Na-P tipi zeolit kristal azlarını oluşturduğu bulunmuştur. Böylece alçı-jel kabuğu altında asit korozyonuna karşı ikinci bir koruyucu kristal tabakanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

SONUÇ

1. Jeotermal sulardaki çözülmüş CO₂ gazının sistemden kaçışının ve buna bağlı pH artışının engellenmesi gerekir. CO₂ basıncının azalması ve buna bağlı pH artışı kalsit çözünürlüğünü azalttığı için kabuklaşmayı teşvik eder.
2. Jeotermal kuyulardaki denge koşulları jeotermal sıvının kullanım kademelerinde sıcaklık ve basınç yönünden değişime uğrar. Sıcaklık artışı CaCO₃ çözünürlüğünü azalttığı için çökmesini teşvik eder ve kabuk oluşturma riskini de beraberinde getirir.
3. Kabuklaşma riski, kullanılacak uygun kabuk engelleyicilerle (inhibitörlerle) azaltılabilir. Ancak boru iç yüzeylerine kabukların yapışmaması, iç yüzeylerde kullanılan kaplamanın kimyasal olarak ilgisiz olması ve kabukla reaksiyona girmemesine bağlıdır. Buna uygun kaplama malzemelerinin geliştirilmesi jeotermal tesislerin ömrünü artıracaktır.
4. Korozyonu şiddetlendiren oksijenin sistem sıvılarına girmesine müsaade edilmemelidir.

KAYNAKLAR

- [1] GİNERHAN, G.G., *et al.*, 'Geothermal Energy Utilization in Turkey', Int. J. Energy Res., 25, p.769-784, 2001.
- [2] ROBERT, C.A., LAWRENCE, B.P., 'Geothermal Chemical Engineering', AIChE Journal, 22, p.817-828, 2004.
- [3] VUATAZ, F., *et al.*, 'Chemical Study of a Low-temperature Geothermal Fluid in a Triassic Sandstone Aquifer: Scaling Potential and Fluid Treatment', Geothermics, 18, p.313-320, 1989.
- [4] KRISTMANNSDOTTIR, H., 'Types of Scaling Occuring by Geothermal Utilization in Iceland', Geothermics, 18, p.183-190, 1989.
- [5] CRIAUD, A and FOULLIAC, C., 'Sulfide Scaling in Low-enthalpy Geothermal Environment', Geothermics, 18, p.73-81, 1989.

- [6] UNGEMACH, P., ROUGE, C., 'Corrosion and Scaling of Geothermal Wells in the Paris Basin. Damage Diagnosis, Removal and Inhibition', Proceedings of the International Workshop on Deposition of Solids in Geothermal Systems, Reykjavik, Iceland, 31pp, 1988.
- [7] HONEGGE, J., *et al.*, 'Detailed Study of Sulfide Scaling at La Courenve-Nord, a Geothermal Exploitation of the Paris Basin, France', *Geothermics*, 18, p.137-144, 1989.
- [8] REYES, A.G., *et al.*, 'Mineral deposits in the Rotokawa geothermal pipelines, New Zealand', *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 119, p. 215-139, 2002.
- [9] ELGUEDRI, M., The United Nations University, Geothermal Training Programme, 'Assessment Of Scaling And Corrosion Problems In The Kebili Geothermal Field, Tunisia', Reports Number 1, Reykjavik, Iceland, 1999.
- [10] GENDENJAMTS, O-E., The United Nations University, Geothermal Training Programme, 'Interpretation Of Chemical Composition Of Geothermal Fluids From Árskógsströnd, Dalvík, And Hrísey, N-Iceland And In The Khangai Area, Mongolia', Reports Number 10, Reykjavik, Iceland, 2003.
- [11] REED, M.H. and SPYCHER, N.F., 'Calculation of pH and Mineral Equilibria in Hydrothermal Water with Application to Geothermometry and Studies of Boiling and Dilution', *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, p.1479-1490, 1984.
- [12] ÇAKIR, A., 'Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü', TMMOB, Mak. Müh. Odası, Yayın No.131, Ankara, 1990.
- [13] GEORGE, B., *et al.*, 'Corrosion and Protection of Carbon Steel in Low Enthalpy Geothermal Fluids. The Case Of Sousaki In Greece', *Geothermics*, 26, p.65-82, 1997.
- [14] SUTTON, M.G., 'Geothermal Corrosion in a Pressure Vessel and Associated Equipment Used for Steam-conditioning Timber', *Australian Corr. Assoc., Proc. Conference 24*, Potorua, New Zealand, 19-23 Nov. 1984, p.1-9.
- [15] SUGAMA, T., 'Interfaces Between Geothermal Brine-induced Scales and SiC Filled Polymer Linings', *Geothermics*, 27, p.387-400, 1998.
- [16] SUGAMA, T., Elling, D. and Gawlik, K., 'Poly(phenylenesulfide)-based Coatings for Carbon Steel Heat Exchanger Tubes in Geothermal Environments', *J. Mater. Sci.*, 37, p.4871-4880, 2002.
- [17] PATZAY, G., KARMAN, F.H., POTA, G., 'Preliminary investigations of scaling and corrosion in high enthalpy geothermal wells in Hungary', *Geothermics*, 32, p.627-638, 2003.
- [18] PARZAY, G., *et al.*, 'Modeling of scale formation and corrosion from geothermal water', *Electrochim. Acta*, 43, p.137-147, 1998.
- [19] BENOIT, W.R., 'Carbonate Scaling Characteristics in Dixie Valley, Nevada Geothermal Wellbores', *Geothermics*, 18, p.41-48, 1989.
- [20] MERCADO, S., *et al.*, 'Scale Incidence on Production Pipes of Cerro Prieto Geothermal Wells', *Geothermics*, 18, p.225-232, 1989.
- [21] WEBER, L., *et al.*, *Geothermal Resource Council Transaction* 22, p.25, 1998.
- [22] SUGAMA, T., *et al.*, 'Calcium aluminate cements in fly ash/calcium aluminate blend phosphate cement systems: Their role in inhibiting carbonation and acid corrosion at a low hydrothermal temperature of 90°C', *J. Mater. Sci.*, 37, p. 3163-3173, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ÇAKIR

1971 yılında İTÜ Metalurji Bölümünden mezun oldu. Küçük Çekmece Nükleer Enerji Merkezindeki kısa bir çalışma dönemi arkasından, M.E. Bakanlığının burslusunu alarak gittiği İngiltere - Leeds Üniversitesinden 1977 yılında Doktora derecesini alarak Türkiye'ye döndü. 1978 - 1982 yılları arasında E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümünde görev yaptıktan sonra, 1982 yılı sonunda D.E.Ü, Makina Mühendisliği Bölümüne Yard. Doç. olarak geçen Ahmet Çakır 1984 de Doçent, 1990 tarihinde Profesör unvanı aldı. 1997 senesinde DEÜ. Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü kurucu üyeleri arasında bulunan Ahmet Çakır halen bu bölümün başkanlığını yürütmektedir.