

KOROZYON VE JEOTERMAL UYGULAMALAR

Hacer AYGÜN

ÖZET

Jeotermal sistemlerde kabuklaşma ve korozyon sistemin ekonomisini ve ömrünü belirleyen en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada, jeotermal sistemlerde oluşan kabuklaşma ve korozyon hakkında temel bilgiler verilmiş ve korozyon türleri açıklanmıştır. Sistemi oluşturan parçaların korozyon davranışları ve uygun malzeme seçimi kısaca açıklanmıştır. Uygulama bölümünde Balçova Jeotermal Sistemi akışkanlarının kimyası incelenerek kabuklaşma ve korozyon eğilimleri Ryznar indeksine göre hesaplanmıştır. Ayrıca sistemi oluşturan parçalarda görülen korozyon türleri incelenerek olası nedenleri ve önerilerde bulunulmuştur. Son bölümde ise jeotermal sistemlerin kurulması, korozyon kontrolü ve incelenmesi için kullanılan uluslararası standartlar verilmiştir.

GİRİŞ

Jeotermal akışkanların kimyasal kompozisyonları kuyudan kuyuya değişiklik gösterir. Aynı kuyudan çıkartılan akışkan kimi zaman korozyon oluşturucu saldırgan bir ortam oluştururken kimi zamanda sadece kabuklaşma yapma eğilimindedir. Bu değişkenlik zamanla değişen fiziksel-kimyasal parametrelerle bağlantılıdır.

Akışkanın kimyasını rezervardaki kayaların içindeki makro elementler ve yeraltı çevre koşulları karakterize eder. Akışkanlarda yüksek oranda çok sık rastlanan elementler:

Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} and CO_2 gas [1].

Erimiş gaz ve katı haldeki elementler farklı etmenlere (ısı ve basınç değişimleri) göre farklı dengelerde bulunurlar ve denge kabuklaşmaya doğru kayar. Kuyularda ve dağıtım sisteminde, kabuklaşma ve korozyon çok ciddi hasarlara ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır [2]. Bu sorunu önlemedeki ilk adım kuyu suyu analizi ile akışkanın korozyon ve kabuklaşma eğilimini belirlemek, deneysel modelleme ile kullanılan malzemelerin korozyon dayançlarını ve korozyon hızlarını bulmak ve sisteme en uygun malzeme seçimini yapmaktır.

KOROZYON

Genel anlamda korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeleri sonucu bozunumlarıdır. Kimyasal korozyon metal ve alaşımların gaz ortamlar içindeki oksitlenmeleridir (kuru korozyon). Metal ve alaşımların sulu ortamlar içindeki bozunumları ise elektrokimyasal veya ıslak korozyon olarak adlandırılır.

Korozyon kaybı birim alana düşen metal miktarı

Korozyon hızı birim süre ve birim alana düşen metal miktarı

Doğrusal korozyon hızı birim süreye uyarlı yüzeyden taşınan tabaka kalınlığı

Korozyon dayanıcı ise birim tabaka kalınlığına uyarlı süredir.

Metal ve alaşımların çeşitli ortamlarda korozyon hızları birim yüzey alanı ve birim zamana düşen ağırlık olarak doğrudan bulunabilir.

Korozyon hızlarını temel alarak metaller korozyon dayançlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [3]:

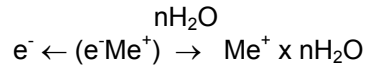
Doğrusal korozyon hızı

1. < 0.13 mm/yıl : Bu gruptaki metallerin korozyon dayançları genelde iyidir.
2. 0.15-1.3 mm/yıl : Yüksek korozyon hızlarına izin verilen durumlarda bu gruba giren metallerin korozyon dayançları yeterli olabilir.
3. > 1.3 mm/yıl : Bu gruptaki metallerin korozyon dayançları yetersizdir.

Korozyon hızının homojen olmadığı çukurcuk ve karıncalanma korozyonunda bu sınıflandırma geçersizdir.

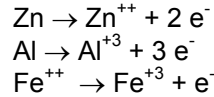
Elektrokimyasal bozunumun olduğu mikroskopik bölge korozyon hücresi olarak adlandırılır. Korozyon hücresini elektrolit (yani saldırgan ortam), anot ve katod olaylarının yer aldığı metaller oluşturur. Yüzeyinde kimyasal indirgenimin olduğu elektrot katot ve kimyasal oksitlenme ile çözünen elektrot da anot adları ile belirlenir.

Anodik Olay: Metal atomlarının negatif yük kaybederek pozitif metal iyonlarına dönüşmeleridir. Başlangıçta yüksek enerjiye sahip metal iyonları belirli sayıda su molekülü ile bağ kurarak alçak enerji durumuna geçerler.



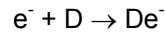
Anodik olayda elektron üretilir.

Anodik tepkimeler:



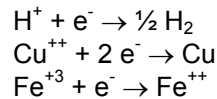
Korozyon anotta oluşur.

Katodik Olay: Anodik olayda üretilen elektronlar buradaki iyon veya moleküller tarafından kabul edilerek indirgenirler (fazla elektron bulundurma).



Burada D elektrolit içindeki iyon veya molekülleri göstermektedir.

Katodik tepkime örnekleri:



JEOTERMAL SİSTEMLERDEKİ KOROZYON TÜRLERİ

Jeotermal sistemlerde pek çok farklı korozyon olayı gözlemlenmiştir. Düşük ve orta dereceli jeotermal sistemlerde çoğunlukla oluşan korozyon türleri:

Homojen Dağılımlı Korozyon

En yaygın korozyon türüdür ve tüm yüzeyde aynı oranda malzeme kaybına neden olur. Metal zamanla incelenerek sonunda delinir. Bu tür korozyon, korozyon hızı ile belirlenir, bir yıldaki kayıp mil (1 mil = 0.001 inch = 0.0254 mm) olarak alınır. Korozyon hızlarına göre metallerin jeotermal sistemdeki kullanım yerleri:

1. Eğer korozyon hızı < 0.15 mm/yıl (5.9 mpy)
Bu gruptaki metallerin korozyon dirençleri oldukça iyidir ve kritik parçalarda kullanılabilir, örneğin, vanalar, pompa şaftları ve kanatçıkları.
2. Eğer korozyon hızı 0.15 mm/yıl $< \text{hız} < 1.5$ mm/yıl (5.9 – 59 mpy)
Bu gruptaki metaller yüksek korozyon hızlarına izin verilen yerlerde kullanılır. Örneğin; tanklar, borular, vana gövdeleri ve civata başları gibi.
3. Eğer korozyon hızı > 1.5 mm/yıl (59 mpy)
Genellikle bu gruptaki metallerin kullanılması uygun değildir.

Jeotermal akışkanın karakteri korozyon hızını etkiler, akışkanın içindeki erimiş gazlar en önemlileridir. *Oksijen* özellikle karbon ve düşük alaşımlı çelikler için en etkili korosiv elementtir. Yaklaşık 30 ppb (parts per billion) oranı karbon çeliğin korozyon hızını dört kat artırır. İlave olarak oksijen, karbondioksit ve hidrojen sülfür ve diğer erimiş gaz ve katı elementlerin korozyon etkilerini de hızlandırır. Erimiş *Karbondioksit* pH'ı düşürür, karbon ve HSLA çelik korozyonlarını artırır.

Çukurcuk Korozyonu

Çukurcuk korozyonu metalin yüzeyinde lokalize çukurcuklar veya delikler oluşturur. Bu tür korozyonun hızı önceden belirlenemez ve korozyon hızı bazı bölgelerde çok yüksek olduğu halde bazı bölgelerde oldukça düşüktür. Eğer bozunum küçük bir alanda oluşuyorsa, anot olayı, sonuçta oluşan çukurcuk derin, eğer bozunum daha geniş bir yüzeyde oluşursa çukurcuğun derinliği sığdır.

Çevrede yeterli oranda Cl^- veya Br^- iyonları varsa normalde pasif olan paslanmaz çelikler belirli bölgelerde korozyona duyarlı hale geçerler ve derin çukurcuk korozyonu oluşur. Cl^- iyonunun paslanmaz çeliklerin yüzeyindeki pasif filmi lokalize olarak bozar, bu bölgelerde pasif filmin ince olması veya yapısındaki küçük değişiklikler buna neden olabilir. Çukurcuk ve gerilimli korozyon çatlakları (SCC) oluşturan klorid iyonu oranı sıcaklığın belirli bir değeri aşmasına bağlıdır. Çelik yüzeyinde yüksek sıcaklıkta, pH 5 ve karbondioksit ile 6070 ppm klorid iyonu çözeltisinde pasif film oluşurken, 133,500 ppm klorid oranı 150°C üzerinde pasif filmi bozar [4].

Klorid ve tiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) 304 ve 316 paslanmaz çeliklerde çukurcuk korozyonuna neden olurlar. Bunlara ek olarak klorid iyonu, 410, 416 ve 420 gibi krom martensitik paslanmaz çeliklerde derin çukurcuk korozyonu oluşturur.

Jeotermal akışkanın içinde erimiş oksijen oranı 50 ppm'in üzerinde ise ciddi çukurcuk korozyonlarına neden olur. Düşük hidrojen iyonu oranı (pH) paslanmaz çeliklerin yüzeyindeki pasif film bozunumlarına neden olabilir.

Çukurcuk korozyonu, ince duvar ve geniş yüzey alanlarına sahip ısı değiştirgeçlerinde önemli bir sorundur, çünkü yüzeyde oluşan tek bir delik çok daha büyük hasarlara neden olabilir.

Aralık Korozyonu

Bu tür korozyon çukurcuk korozyonu gibidir, ancak oluşum yerleri farklıdır. Adından da anlaşılacağı gibi, ısı değiştirgeci plakalarının üst üste bindiği yerler, tüp ve tüp levhalarının bağlantı yerleri veya kabuklaşmanın olduğu aralıklarda oluşur. Çukurcuk korozyonunda olduğu gibi korozyon hızı belirlenemez. Paslanmaz çeliklerde, metal-matal, plastik-metal veya kabuki-metal arayüzeylerinde çok derin ve keskin aralık korozyonu oluşabilir.

Ara yüzeylerde farklı oksijen oranları potansiyel fark yaratarak akım oluştururlar ve bu da metalin iyonlaşmasına neden olur. Boruların bağlantı yerlerinde veya conta bağlantılarında önemli hasarlara neden olan bu korozyon türünün hızı önceden belirlenemez.

Gerilimli Korozyon Çatlakları (SCC)

Mild çeliklerine elastik sınır değerine yakın veya üzerinde çekme gerilimi uygulandığında, aniden alkali veya nitrat çözeltilerine karşı zayıflarlar [5]. Böylece tanelerarası çatlaklar oluşur. Bu çatlaklara, kullanım sırasında parçaların üzerine uygulanan çekme gerilimi veya üretim aşamasında parça içinde kalan gerilimler neden olur. Buna karşın uygulanan basma gerilimi çatlak oluşturmaz. Çelik, pirinç ve paslanmaz çelik gibi sünek malzemelerin kırılması bu çatlaklardan dolayı oluşur. Parçanın kırılma zamanının dakikalara veya yıllara bağlı olması, gerilim ve çevreye etmenlerine bağlıdır.

Paslanmaz çeliklerde klorid bazı durumlarda çatlak oluşumuna neden olurken, bazı tür bakır alaşımları da az miktardaki amonya ile tepkimeye girer (amonya-SCC). Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler hidrojen sülfür içeren suda gerilime maruz kalırsa gerilimli korozyon çatlaklarının özel bir durumu ortaya çıkar, sonuç sülfür-SCC olarak adlandırılır. Düşük pH (< 5), yüksek dayanımlı düşük alaşım çeliklerin ve bazı diğer alaşımlarla kaplanmış çeliklerin kullanımına olanak verir.

Erozyon-Korozyonu

Korozyon, erozyon olayı ile birleşerek çelik, dökme-demir, bakır ve alüminyum alaşımlarının bozunmasına neden olur. Bu tür korozyon, alaşımın içinden kritik hızdan daha hızlı bir akışkan aktığı durumlarda ortaya çıkar. Karakteristik olarak, akışkanın hızı azaldığında korozyon hızı da azalır.

Tanelerarası Korozyon

Ferritik veya östenitik paslanmaz çeliklere uygun olmayan ısı-ışıl işlem uygulandığında, yapı tanelere ayrılır, diğer bir deyişle tane sınırları oluşur. Bu tane sınırları korozyona oldukça duyarlıdır. Bu durum, düşük sıcaklıklı jeotermal ortamlarda östenitik paslanmaz çeliklerde oluşabilir, ancak bunun oluşabilmesi için, paslanmaz çeliğin ısı-ışıl işlem sırasında hasar görmesi veya uygun olarak kaynak yapılmamış olması gerekir. Bu tür korozyon malzemenin mekanik dayanıcını önemli oranda düşürür.

Islak hidrojen sülfür, 200 °C'nin altında martensitik paslanmaz çeliklerde (400 serisi) tanelerarası ve tane içi korozyona sebep olur.

Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, bir metal (galvanik seride daha aktif olan) diğer bir metal (galvanik seride pasif olan) ile elektriksel olarak temas halindeyse oluşur. Galvanik korozyonu etkileyen faktörler; devrenin iletkenliği, anot ile katot arasındaki potansiyel farkı, polarizasyon, anot ve katodun yüzey alanları, farklı metallerin yüzey geometrileri ve metallerin temaslarıdır. En yaygın örnek, bakır kaplanmış çeliklerdir, sonuç olarak çeliğin korozyona uğraması hızlanır. Farklı metalle kaplanmış titanyum alaşımlarında bu tür korozyon görülmez, ancak titanyum alaşımının üzerindeki pasif filmi bozacak başka çevre koşulları

yoksa. Yakınından güç hattı geçen veya diğer elektrik sistemlerinin yarattığı galvanik hücre hareketi olan kuyu içi kaplamalarda çukurcuk korozyonu da oluşabilir.

Zemin Korozyonu

Zemin korozyonu, jeotermal sistemlerde yer altına döşenen boru hatları ve kompensatörler için önemli bir sorun oluşturmaktadır. Zeminin saldırganlığı, toprak cinsine, nem miktarına, pH-değeri ve toplam asitliliğine, içerdiği çeşitli maddelerin (H₂S, sülfürler, kömür, klor ve sülfat iyonları) miktarına ile havalandırma koşullarına bağlıdır. Ancak havalandırmanın yeterli olmadığı suya doymuş topraklarda, örneğin göl ve deniz kıyılarında sülfatları sülfürlere indirgeyen bakteriler korozyona yol açarlar. Bu etmenler çoğunlukla zeminin direncini etkilerler. Tablo 1'de çelikler için zemin öz direncine göre korozyon hızı verilmiştir.

Tablo 1. Zemin direncine göre çeliğin korozyon hızı

Zemin öz direnci ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Ortalama korozyon hızı (mm/yıl)
< 1000	0.18
1000-12000	0.08
> 12000	0.03

Zemin korozyonunun oluşum düzeni elektrokimyasaldır. Zemin türü, su ve hava geçirgenlik özellikleri, nem miktarı ve yayılma özelliklerindeki yerel değişimler oksijenin farklı hızlarda boru yüzeyine ulaşmasını sonuçlarlar. Bu koşullar boru yüzeyinde anodik ve katodik bölgelerin ayrışmasına ve bunlar arası kurulu korozyon hücrelerinin oluşmasına neden olurlar. Katodik bölgeler alanının anodik bölgeler alanına oranı korozyon hızını artırıcı diğer bir etmenddir.

Zeminde bozunma genellikle çukurcuk korozyonu türündendir. Bu özellikle katodik bölgelerin kuvvetle polarizasyonuna yol açan zeminler için geçerlidir.

Ekonomik olmasından dolayı zeminde kullanılan boru malzemeleri genellikle çelik ve dökme demirdir. Uygun yüzey kaplamaları ve katodik koruma yöntemi ile en saldırgan zeminlerde bile bu malzemelerle yeterli çalışma ömrüne ulaşılabilir.

Korozyon hızı zemindeki farklı oksijen oranlarına göre farklı olabilir. Örneğin, bir boru farklı oksijen geçirgenliğine sahip iki farklı zeminden geçiyorsa, galvanik akım daha az havalandırılmış zeminden (anodik) daha fazla havalandırılmış zemine doğru olacaktır.

Zemin geçirgenliği korozyon dayancını belirleyen diğer bir etmenddir. Geçirgenlik aynı zamanda zemin saldırganlığını da belirler. Tablo 2'de demir esaslı malzemeler için zemin geçirgenliğinin korozyona etkisi verilmektedir.

Tablo 2. Zemin geçirgenliğinin etkisi (demir esaslı malzemeler için)

Zemin geçirgenliği, $\Omega \cdot \text{m}$	Sınıflandırma
<7	Çok korosiv
7-20	Korosiv
20-50	Orta derece korosiv
>50	Çok az veya hiç korosiv değil

Biyolojik Korozyon

Ortamda içeren bakterilerin yol açtıkları mikrobiyolojik oluşumlar korozyon olayını farklı mekanizmalarla etkilerler. Bunlardan en yaygın olanı yetersiz havalandırılmış ortamlarda yaşayan bakterilerin sülfatları (genellikle CaSO_4) H_2S ve sülfürlere indirgemeleridir. Bu bakteriler desulfovibrio grubundandır.

Sülfata indirgemenin oluşması için:

1. Ortam sülfatları ve bakterilerin oluşumu için gerekli organik maddeleri içermelidir.
2. Ortam oksijen bakımından fakir olmalı ve oksijenin yayınmasına izin vermeyecek özellikte bulunmalıdır (bataklık ve ekilmeye elverişli sulak araziler).
3. Ortamın pH-değeri 5.5-8.5 arasında olmalıdır.
4. Ortam sülfat indirgeyen bakterileri içermelidir.

Bozunma genellikle çukurcuk korozyonu türündedir. Biyolojik korozyon zeminde kullanılan çelik boruların hızla bozunmasına ve çalışma ömrünün önemli ölçüde kısalmasına neden olur. Bu tür korozyonun etkinliği koruyucu yüzey kaplamalarının zamanla veya yer yer bozunması ile artar.

KABUKLAŞMA

Jeotermal akışkanlar silica, kalsit sülfat ve kalsiyum florid ile doymuş haldedirler. Sıcaklık ve basınç değişiklikleri denge halindeki bu doymuş çözeltiyinin kabuklaşma eğilimini artırır [2,6,7]. Genellikle kalsiyum karbonat oksit, hidroksit, silica gibi elementler ile birlikte yüzeyde kabuk oluşturur. Kalsiyum karbonat kabuklaşması oda sıcaklığında kübik yapıda bulunurken 50°C 'nin üzerinde iğnemi yapıda olur [8].

Kalsiyum karbonatın çözünürlüğü, sıcaklık, kalsiyum iyon oranı ve akışkan içinde çözünmüş diğer elementlere bağlıdır. Karbonat iyon oranı ise karbonat ve biyokarbonat iyonlarının dağılımını kontrol eden akışkanın pH'ine bağlıdır. Çoğu jeotermal akışkanın pH'i karbondioksit basıncı ile kontrol edilir. Karbondioksit çıkışı akışkanın pH'inin artmasına, dolayısı ile de kalsiyum karbonatın çökmesine neden olur [4]. Kalsiyum karbonatın akışkan içindeki çözünürlüğü azalan sıcaklık ile artar. Bunun anlamı, akışkanın basıncı, karbondioksit çıkışını önleyecek basınçta tutulursa kalsiyum karbonat çökmesi önlenir.

Silikat bazlı kabuklaşma aynı zamanda demir ve alüminyumda içerir. Demir ve alüminyumca zengin silika kabuklaşması içeren pek çok jeotermal kaynaklar literatürde verilmiştir [9-11]. Bununla beraber, saf amorf silika, demir silikat ve alüminyum silikat kabuklaşması akışkanının asit işlemi ile önlenir [10]. Akışkanın pH'i arttıkça kabuk oluşturma reaksiyonu azalır. Akışkanın pH'i hidroklorik, sülfürik veya karbosilik asitlerle 5 in altına veya 9'un üzerine çıkarılması alüminyum-silika kabuklaşmasını önler [9]. Ancak bu işlem sırasında korozyona karşı önlemler alınmalıdır. Akışkanın pH'inin düşük olması (< 4), yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde kullanılan boru ve diğer ekipmanlar için oldukça korosiv bir ortam yaratacağından bu tür sistemlerdeki borularda korozyon dayancı yüksek alaşımlı malzemeler kullanılmalıdır.

Bazı organik ve asidik kabuk önleyiciler kabuklaşmanın oluşmasını engeller. Örneğin, sülfür asitleri, H_2SO_3 , tuzlu su asitleme proseslerinde silika kabuklaşmasını önlemede başarı ile kullanılmaktadır [12]. Bu asitin zayıf olması, sülfürik asit, H_2SO_4 , veya hidroklorik asit, HCl, gibi kuvvetli asitlere oranla daha az korosivdir. Ayrıca, jeotermal sistemlerde oluşan kabuklaşma doğrudan kimyasal işlem veya mekanik, hidrolik veya mekanik/hidrolik yöntemlerle uzaklaştırılabilir [13].

Jeotermal akışkanın kabuklaşma ve korozyona eğilimi pek çok yöntemle belirlenebilir ve uygun malzeme seçimi buna göre yapılır. Çünkü kabuklaşma ve korozyon birbirinden ayrılmaz olaylardır.

Bir pilot tesiste jeotermal veya CO₂ ile CaCO₃ ile doymuş saf su kullanılarak kabuk oluşum modellemesi yapılabilir [2,14]. Korozyon potansiyeli ölçüm yöntemi ile korozyon kaybı ölçümü veya Tafel modeli ile korozyon hızı ölçümü yöntemleri kullanılan metalik malzemelerin korozyon eğilimleri belirlenebilir [15].

Langelier ve Ryznar Index [4,2,16] yöntemleri ise jeotermal akışkanın kalsiyum karbonat kabuklaşma eğilimini nitel olarak tahmin eden yöntemlerdir.

Langelier doymuşluk indeksi (LSI) :

$$LSI = pH - pH_s \quad (1)$$

Negatif LSI değeri akışkanın korozyon, pozitif değer ise kabuklaşma eğilimini belirler.

Ryznar karalılık indeksi ise (RSI) :

$$RSI = 2 pH_s - pH_a \quad (2)$$

Burada:

pH_s = bu pH'ın üzerinde kalsiyum karbonat çökmesi

pH_a = akışkanın ölçülen pH'ı

Açıklamalar Tablo 3. de verilmiştir:

Tablo 3. Ryznar indeksine göre jeotermal akışkanın kabuklaşma ve korozyon eğilimi

Ryznar İndeks	Akışkanın Eğilimi
< 4.0	Aşırı kabuklaşma
4.0 to 5.0	Kuvvetli kabuklaşma
5.0 to 6.0	Orta derecede kabuklaşma
6.0 to 7.0	Az kabuklaşma veya korozyon
7.0 to 7.5	Etkili korozyon
7.5 to 9.0	Ağır korozyon
> 9.0	Kabul edilemez korozyon

JEOTERMAL SİSTEMLERDE KULLANILAN MALZEMELER

Jeotermal akışkanlarda bulunan kimyasal elementlerin çözünürlükleri akışkanın sıcaklığı arttıkça artar. Kimyasal içerik kuyuların buldukları yerlere göre değişse de her akışkanın içinde bu çözülmüş kimyasal elementler farklı oranlarda bulunur.

Kimyasal elementlerin metalik malzemelere olan etkileri jeotermal sistem dizayn parametrelerinin de belirleyicisidir. Örneğin, hidrojen sülfür bazı bakır ve nikel alaşımlarına karşın saldırganken, karbondioksit karbon çeliklerin korozyonunu hızlandırır ve amonya bakır alaşımlarında çatlaklara ve mild çeliklerinin korozyonlarını hızlandırıcı bir etki yapar. Böylece her bir kuyu akışkanının kimyasal analizi alınarak uygun malzeme seçimi yapılmalıdır.

Düşük sıcaklıklı jeotermal uygulamalarda boru malzemesi olarak hem metalik hem de metalik olmayan malzemeler kullanılabilir. Karbon çeliği, bakır, PVC, CPVC, ve polietilen malzemeler jeotermal

dağıtım sisteminde yaygın olarak kullanılan malzemelerken [17,18], bazı sistemlerde cam takviyeli kompozitler [18], ve asbes-çimento [17,19] kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanlar için plastik bazlı malzemeler uygun olmazken asbes-çimento karışımı malzemelerde sağlık açısından oldukça zararlıdır.

Jeotermal sistemlerde metalik malzeme kullanıldığı durumlarda kabuklaşma ve korozyon kaçınılmazdır [17,20].

Tablo 4-6 da düşük sıcaklıklı jeotermal sistemleri oluşturan boru, vana ve ısı değiştirgeçlerinde yaygın kullanılan metalik malzemeler, kullanım performans önerileri ve bu malzemelerin korozyona karşı dizayn önerileri verilmektedir [4]:

Tablo 4. Borular

Malzeme	Korozyon Önerileri	Dizayn Önerileri
<i>Karbon Çeliği</i>	Pek çok durumda çok az bir testle veya hiç test yapmadan güvenle kullanılır, korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır. Oksijen tamamiyle ortamdan uzaklaştırılmalıdır. Havalandırma korozyon hızını 10 kattan fazla artırır.	Oksijen birikimi pekçok ciddi local korozyona neden olabilir. Sisteme oksijen girdisi en aza indirilmelidir. Vented tanklarda kullanılmamalıdır. Özellikle devridaim tanklarda oksijen temizleyicisi olmadan kullanılmamalıdır. Dış yüzeyler yeraltı sularından korunmalıdır.
<i>Galvanik Çelik</i>	Büyük bir olasılıkla kullanılmaz. İşletme sıcaklığında çinko koruyucu değildir ve hızlı çukurcuk korozyonuna neden olur.	
<i>Bakır</i>	Sınırlı durumlar için uygundur. Doğrulama testleri şiddetle önerilmektedir. Korozyon ve dizayn uyarıları dikkate alınmalıdır. Kalın duvarlı uygulamalarda kullanılabilir. Bakır-sülfat korozyon ürünü kabuklaşmaların oluşturduğu çatlaklarda aralık korozyonu gözlemlenmiştir. Uygun lehim gerçekleştirilmelidir.	Eğer kullanıldıysa kolayca değiştirilebilir şekilde dizayn edilmelidir. Akışkanın hız limiti <90 mm/s olmalıdır. Düşük-kurşun, yüksek kalay lehimi kullanılmalıdır.
<i>Cam Takviyeli Plastik Boru</i>	Uzun süreli uygunluğu doğrulanmamıştır. Oksijen girdisi önemli değildir. Zamanla süzünme kırılması dayancının düşmesiyle kopar. 100,000 saat (11.4 yıl) dan sonra kabul edilebilir dayancın tahmini konusunda yeterli veri yoktur. Yüksek sıcaklıkta kullanımında mekanik özelliklerini kaybeder.	Üreticinin sıcaklık, basınç ve gerilim limitleri bilinmelidir. Bağlantılar üretici talimatları doğrultusunda yapılmalıdır. Yıvli bağlantı kullanılmamalıdır.
<i>CPVC Boru</i>	Büyük bir olasılıkla kabul edilemez. Uzun süreli kullanımında kırılabilir.	

Tablo 5. Vanalar

Malzeme	Korozyon Önerileri	Dizayn Önerileri
<i>Karbon çelik trimli karbon çelik gövde</i>	Kullanımı uygun değildir. Trim ömrü çoğu uygulamalar için yetersizdir. Sap/seal/hava arayüzeyinde bölgesel korozyon oluşur. Havalandırma hızlı bozunuma neden olur.	Olası kırılmalar trimde oluşur. Vanalar kolayca açılarak tamir ve bakım yapılabilir. Flanj veya waver dizayn tercih edilmelidir. Yivli parçalar enaza indirgenmelidir. Plug (yuvarlak) vanalar yüksek devirli kullanımlar için önerilmez, çünkü plug /sap arayüzeyinde korozyon problemi ve sonucunda sapın dönememesi veya kırılması sorunu oluşur.
<i>Östenitik olmayan paslanmaz çelik trimli karbon çeliği gövde</i>	Az sayıda uygulama için kabul edilebilir. Doğrulama testi kesinlikle yapılmalıdır. Korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır. Trimlerdeki çukurcuk korozyonu önemli bir sorun oluşturur. Havalandırma gövdenin hızla korozyona uğramasına neden olur.	Gate vanalar yüksek devirli uygulamalar için önerilmez, ters sap hareketi sonucu seal kırılır veya dönemez.
<i>Östenitik paslanmaz çelik saplı karbon çelik gövde</i>	Pek çok durumda çok az veya hiç test yapılmadan güvenle kullanılır. Korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır. Havalandırma gövdenin hızla korozyona uğramasına neden olur.	Top veya kelebek vanalar yüksek devirli kullanımlar için önerilir, çünkü sapın hızlı dönüşü sap/seal problemini azaltır. Östenitik paslanmaz çelik veya elastomer (Buna N, Viton, TPE) yataklama uygundur.

Tablo 6. Isı değiştirgeçleri

Malzeme	Korozyon Önerileri	Dizayn Önerileri
<i>Karbon çeliği</i>	Oksijen tutucu kullanılmadığı durumlarda önerilmez. Eğer akışkan devamlı olarak fazla sülfat ile işleniyorsa bazı durumlar için uygundur, ancak doğruluk testi yine de önerilir. Korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır.	Sürekli oksijen tutucu kullanımı gerekir.
<i>Bakır</i>	Uygun değildir. Isı değiştirgeci korozyon hızı kupon hızından daha fazladır. H ₂ S ppb ile sürekli bir malzeme kaybı oluşur. Uygun bir kaynak malzemesi yoktur.	Eğer kullanılıyorsa, dizaynı kolaylıkla sökülebilir ve değiştirilebilir olmalıdır. Akışkanın hız limiti <90 mm/s olmalıdır. Düşük-kurşun, yüksek-kalay lehimler önerilir ancak sonuç kesin değildir.
<i>Aluminyum</i>	Kullanımı uygun değildir. Aşırı korozyon hızı ile felaket çukurcuk korozyonu.	
<i>Östenitik paslanmaz çelik</i>	Pek çok durum için uygundur ancak doğrulama testi önerilir. Korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır. T304 çeliğinde 60°C'nin üzerinde gerilimli korozyon çatlakları oluşur. Molibden ilavesi ile gerilimli korozyon çatlak dayancı artar. Yüksek sıcaklıklarda yüksek klorid oranı ve oksijen ile T304 çeliğinde çukurcuk ve aralık korozyonu oluşur. Molibden ilavesi ile çukurcuk ve aralık korozyon dayancı artar. T316L çeliği minimum değer için önerilir. Asitler ile temizlenebilir.	Kolay temizlenebilir ve ucuz olması bakımından plaka-tipi ısı değiştirgeçleri önerilir. Şekil verme işleminden sonar gerilim giderme yapılmalıdır. Fiber conta kullanılmamalıdır. Viton conta önerilir. Havalandırma minimum olmalıdır.
<i>Titanyum</i>	Ortamda florid iyonu yoksa çok az test ile veya hiç test yapmadan pek çok durum için güvenle önerilir, ancak korozyon ve dizayn önerilerine uyulmalıdır. Temizlemede asit kullanılacaksa dikkatli olunmalıdır. Çelik aletler kullanılırken yüzey çizilmemelidir.	Kolay temizlenebilir ve ucuz olması bakımından plaka-tipi ısı değiştirgeçleri tüp veya kılıf şeklinde olanlara oranla daha çok tavsiye edilir.

UYGULAMALAR

Kabuklaşma ve Korozyon Eğilimi

Bu bölümde, Balçova Jeotermal Isı Dağıtım Sistemindeki kuyulardan alınan akışkanların kabuklaşma ve korozyon oluşturma eğilimleri Ryznar İndeksi kullanılarak belirlendi. Kuyulardan en yüksek, orta ve en düşük sıcaklı olanlardan üç tanesinin Ryznar indeksi hesaplandı. Tablo 7'de bu üç kuyunun akışkan kimyasal analizi, kuyu suyu sıcaklığı ve pH'ı verilmiştir.

Tablo 7. Kuyu akışkanları kimyasal analizi

Kuyu adı	Sıcaklık	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻
1. B-11 ¹¹	93°C	7.22	34	411	36	13	761		170	194
2. B-5 ²	114°C	8.6	28	400	12	7	494	66	176	213
3. BTF-3 ¹¹	103°C	7.3	31	364	34	21	615		167	198

Tüm sonuçlar mg/litre olarak verilmiştir.

İyonik Denge: Akışkanın elektronötürlüğünü kontrol etmek için her bir kuyu akışkanının içerdiği iyonların toplam anyon ve katyon oranları hesaplandı (Tablo 8).

Tablo 8. B-11¹¹ kuyusu toplam anyon ve katyon oranı

Katyonlar:		/moleküler ağırlık(mg)	<u>Mol/L</u>		<u>eq/L</u>
pH	7.22		$10^{-\text{pH}} = 6.03 \cdot 10^{-8}$	x1=	$= 6.03 \cdot 10^{-8}$
Na ⁺	411 mg/L	/22989.2	$= 1.788 \cdot 10^{-2}$	x1=	$= 1.788 \cdot 10^{-2}$
K ⁺	34 mg/L	/39102.0	$= 8.695 \cdot 10^{-4}$	x1=	$= 8.695 \cdot 10^{-4}$
Ca ⁺²	36 mg/L	/40080.0	$= 8.982 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 1.796 \cdot 10^{-3}$
Mg ⁺²	13 mg/L	/24312.0	$= 5.347 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 1.069 \cdot 10^{-3}$
Toplam Katyon (eq/L):					= 0.02161

Anyonlar:		/moleküler ağırlık(mg)	<u>Mol/L</u>		<u>eq/L</u>
SO ₄ ⁻²	170 mg/L	/96061.6	$= 1.770 \cdot 10^{-3}$	x2=	$= 3.539 \cdot 10^{-3}$
HCO ₃ ⁻	761 mg/L	/61017.3	$= 1.247 \cdot 10^{-2}$	x1=	$= 1.247 \cdot 10^{-2}$
CO ₃ ⁻²	mg/L	/60009.4		x2=	
Cl ⁻	194 mg/L	/35453.0	$= 5.472 \cdot 10^{-3}$	x1=	$= 5.472 \cdot 10^{-3}$
Toplam Anyon (eq/L):					= 0.02148

Toplam anyon ve toplam katyon arasındaki fark 0.00013 eq/L, yani 0.6 % ile oldukça kabul edilebilir bir orandır.

Ryznar İndeksi:

$$\text{pHs} = \text{pCa} + \text{pALK} + K_c \quad (3)$$

burada,

pH_s = kalsiyum karbonat çökmesi oluşum pH 'i,

pCa = $-\log [Ca]$, burada $[Ca]$ Tablo 8'de verilen kalsiyumun molar konsantrasyonu,

$pALK$ = $-\log [ALK]$, burada $[ALK] = [HCO_3^-] + 2 [CO_3^{2-}] + 10^{pH-14} - 10^{-pH}$ (Tablo 8)

K_c = kompleks bir sabit olup iki denge sabiti ve aktivite katsayısı içerir, hepsi sıcaklığa bağlıdır. K_c değerini en az hata ile bulmak için grafiksel yöntemler vardır [11].

B-11¹¹ kuyusu için denklem (3) kullanılarak bulunan Ryznar indeksi:

$$pCa = -\log 8.982 \cdot 10^{-4} = 3.047$$

$$pALK = \log (1.247 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 0 + 10^{7.22-14} - 10^{-7.22}) = 1.904$$

$$K_c \cong 1.24$$

$$pH_s = 3.047 + 1.904 + 1.24 = 6.191$$

$$pH_a = 7.22 \text{ (Table 3)}$$

$$\begin{aligned} \text{Ryznar İndeksi} &= 2 pH_s - pH_a = 2 \cdot 6.191 - 7.22 \\ &= 5.162 \cong 5.2 \end{aligned}$$

B-5² için aynı hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 9'da kuyu akışkanının toplam anyon ve katyon hesapları verilmiş ve Ryznar indeksi 4.4 olarak bulunmuştur.

Tablo 9. B-5² kuyusu toplam anyon ve katyon oranları

Katyonlar::		/moleküler ağırlık(mg)	<u>Mol/L</u>		<u>eq/L</u>
pH	8.6		$10^{-pH} = 2.512 \cdot 10^{-9}$	x1=	$= 2.512 \cdot 10^{-9}$
Na ⁺	400 mg/L	/22989.2	$= 1.740 \cdot 10^{-2}$	x1=	$= 1.740 \cdot 10^{-2}$
K ⁺	28 mg/L	/39102.0	$= 7.161 \cdot 10^{-4}$	x1=	$= 7.161 \cdot 10^{-4}$
Ca ⁺²	12 mg/L	/40080.0	$= 2.994 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 5.988 \cdot 10^{-4}$
Mg ⁺²	7 mg/L	/24312.0	$= 2.879 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 5.758 \cdot 10^{-4}$
Toplam katyon (eq/L):					= 0.01929

Anyonlar:		/moleküler ağırlık(mg)	<u>Mol/L</u>		<u>eq/L</u>
SO ₄ ⁻²	176 mg/L	/96061.6	$= 1.832 \cdot 10^{-3}$	x2=	$= 3.664 \cdot 10^{-3}$
HCO ₃ ⁻	494 mg/L	/61017.3	$= 8.096 \cdot 10^{-3}$	x1=	$= 8.096 \cdot 10^{-3}$
CO ₃ ⁻²	66 mg/L	/60009.4	$= 1.1 \cdot 10^{-3}$	x2=	$= 2.2 \cdot 10^{-3}$
Cl ⁻	213 mg/L	/35453.0	$= 6.008 \cdot 10^{-3}$	x1=	$= 6.008 \cdot 10^{-3}$
Toplam anyon (eq/L):					= 0.01997

Toplam katyon ve anyon farkı 3.4 %, kabul edilebilir bir değer

B-5² Kuyusu Ryznar indeksi:

$$pCa = -\log 2.994 \cdot 10^{-4} = 3.524$$

$$pALK = \log (8.096 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1.1 \cdot 10^{-3} + 10^{8.6-14} - 10^{-8.6}) = 1.987$$

$$K_c \cong 1$$

$$pH_s = 3.524 + 1.987 + 1 = 6.511$$

$$pH_a = 8.6 \text{ (Tablo 9)}$$

$$\text{Ryznar indeksi} = 2 pH_s - pH_a = 2 \cdot 6.511 - 8.6 = 4.422 \cong 4.4$$

BTF-3¹¹ kuyu akışkanı Ryznar indeksi:

Tablo 10. BTF-3¹¹ kuyu akışkanı toplam katyon ve anyon oranı

Katyonlar:		/moleküler ağırlık(mg)	Mol/L		eq/L
pH	7.3		$10^{-pH} = 5.012 \cdot 10^{-8}$	x1=	$= 5.012 \cdot 10^{-8}$
Na ⁺	364 mg/L	/22989.2	$= 1.583 \cdot 10^{-2}$	x1=	$= 1.583 \cdot 10^{-2}$
K ⁺	31 mg/L	/39102.0	$= 7.928 \cdot 10^{-4}$	x1=	$= 7.928 \cdot 10^{-4}$
Ca ⁺²	34 mg/L	/40080.0	$= 8.483 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 1.697 \cdot 10^{-3}$
Mg ⁺²	21 mg/L	/24312.0	$= 8.638 \cdot 10^{-4}$	x2=	$= 1.728 \cdot 10^{-3}$
Toplam katyon (eq/L):					= 0.02005

Anyonlar:		/moleküler ağırlık(mg)	Mol/L		eq/L
SO ₄ ⁻²	167 mg/L	/96061.6	$= 1.738 \cdot 10^{-3}$	x2=	$= 3.477 \cdot 10^{-3}$
HCO ₃ ⁻	615 mg/L	/61017.3	$= 1.008 \cdot 10^{-2}$	x1=	$= 1.008 \cdot 10^{-2}$
CO ₃ ⁻²	mg/L	/60009.4	=	x2=	=
Cl ⁻	198 mg/L	/35453.0	$= 5.585 \cdot 10^{-3}$	x1=	$= 5.585 \cdot 10^{-3}$
Toplam anyon (eq/L):					= 0.01914

Toplam katyon ve anyon arasındaki en büyük fark 4.5% oran ile bu kuyuda bulunmuş olmasına karşın kabul edilebilir değer içindedir (10%'un altında).

$$pCa = -\log 8.483 \cdot 10^{-4} = 3.054$$

$$pALK = \log (1.008 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 0 + 10^{7.3-14} - 10^{-7.3}) = 1.997$$

$$K_c \cong 1.11$$

$$pH_s = 3.054 + 1.997 + 1.11 = 6.161$$

$$pH_a = 7.3 \text{ (Tablo 10)}$$

$$\begin{aligned} \text{Ryznar indeksi} &= 2 pH_s - pH_a = 2 \cdot 6.161 - 7.3 \\ &= 5.022 \cong 5.0 \end{aligned}$$

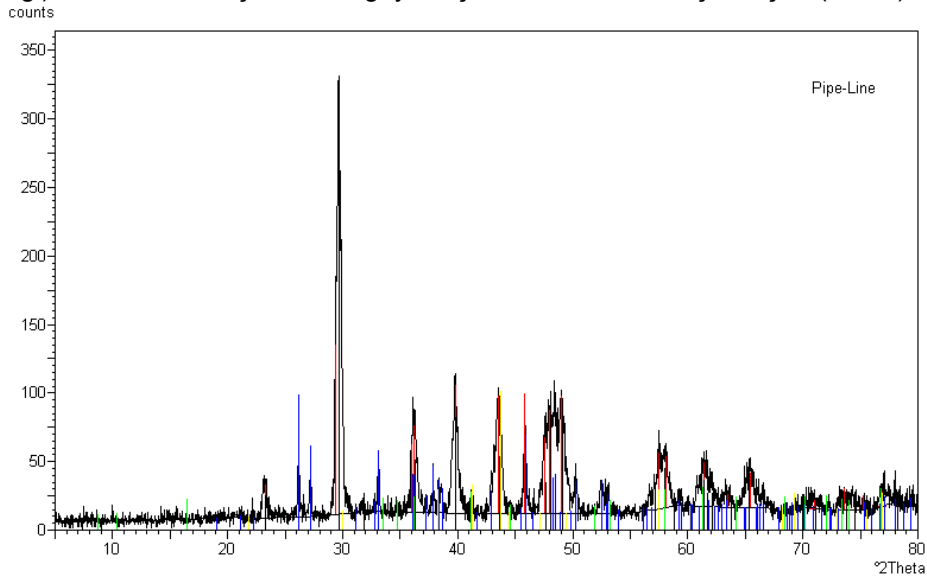
Sonuç olarak, üç farklı sıcaklıkta alınan kuyu akışkan Ryznar indeksi hesaplamalarına göre kuyu akışkan sıcaklığı arttıkça akışkanın pH'inin arttığı Ryznar indeksinin ise azaldığı görülmüştür (Tablo 11).

Tablo 11. Kuyu sıcaklık, pH ve Ryznar indeksleri

Kuyu adı	Sıcaklık	pH	Hesaplanan Ryznar İndeksi
B-11 ¹¹	93°C	7.22	5.2
BTF-3 ¹¹	103°C	7.3	5.0
B-5 ²	114°C	8.6	4.4

Her üç kuyu akışkanı Ryznar İndeksi sonuçlarına göre orta dereceli kabuklaşma olası gözükmemektedir.

Balçova Jeotermal Dağıtım sisteminde kullanılan ısı değıştirgeçleri, boru ve kompensatörlerde kabuklaşma tespit edilmiştir. Kompensatörün iç kısmında oluşan kabuklaşma Resim 1 de gösterilmektedir. Borularda oluşan kabuklaşmanın X-ray diffraction yöntemi ile incelenmesi sonucu (Şekil 1) kalsiyum karbonat (siyah ve mavi çizgiler) ve/veya magnezyum karbonat (siyah çizgi) kabuklaşması olduğu saptanmıştır. Ayrıca düşük oranda demir nitrat (sarı çizgi) ve sodyum demir oksit (yeşil çizgi) vardır. Kabuklaşma kalınlığı yaklaşık 0.4 mm olarak ölçülmüştür (Res.2).



Şekil 1. Borularda oluşan kabuklaşmanın X-ray analiz diyagramı
siyah: (Ca,Mg)CO₃, mavi: CaCO₃, sarı: Fe₃N ve yeşil: NaFeO₂

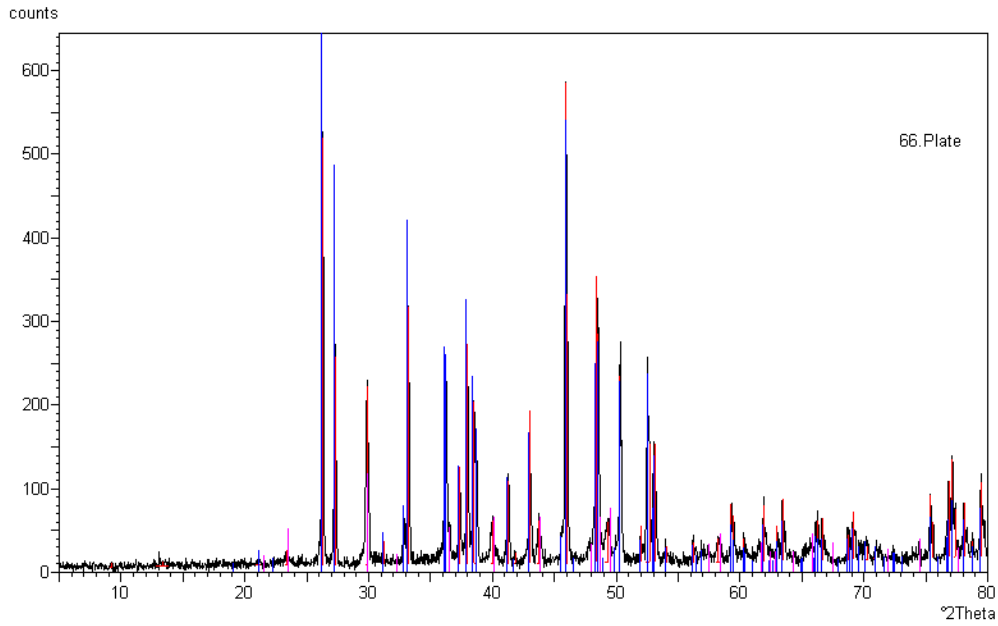


Resim 1. Kompensatörün iç kısmında oluşan kabuklaşma



Resim 2. Kabuklaşma kalınlığı

Borularda ve kompansatörlerdeki akışkan şebeke suyu olduğundan kabuklaşmanın kalsiyum karbonat ağırlıklı olması doğaldır. Jeotermal sistemlerde kuyu akışkanının doğrudan etkilediği ısı değiştirgeçlerinde oluşan kabuklaşma X-ray analiz sonucuna göre (Şekil 2) kabuklaşma neden olan sadece kalsiyum karbonat (mavi çizgi) ve kalsiyandır (kırmızı çizgi).



Şekil 2. Isı değiştirgeçinde oluşan kabuklaşmanın X-ray analiz diyagramı
mavi: CaCO_3 ve kırmızı: $\text{Ca}(\text{Mn},\text{Ca})(\text{CO}_3)_2$

Buradan da görüldüğü gibi doğrudan jeotermal akışkana maruz kalan ısı değiştirgeçlerindeki kabuklaşmanın nedeni akışkan içerisinde bulunan kalsiyum karbonat ve az miktardaki mangandır. Kuyu pompaları, vanalar ve ısı değiştirgeçlerindeki kabuklaşmayı önlemek için inhibitör kullanılmaktadır.

Korozyon Türleri

Balçova Jeotermal Dağıtım sisteminde korozyona uğrayan kompensatör, dirsek, borularda ne tür korozyon türleri oluştuğunu bulmak için gözle muayane ve sıvı penetran muayenesi yapılmıştır. Bu muayene sonuçlarına göre genelde borularda homojen dağılımlı korozyon ve çukurcuk korozyonu gözlemlenirken kompensatörlerde gerilimli korozyon çatlakları saptanmıştır.

Homojen Dağılımlı Korozyon:

İncelenen levhanın (Res.3) homojen dağılımlı korozyona uğrayarak koptuğu saptanmıştır. Mikrometrik ölçüm sonuçlarına göre levhanın et kalınlığı 2.45-0.5 mm arası değişmektedir. Bulunduğu ortam toprakaltı olarak düşünülen levhanın, yetersiz havalandırma sonucu oksijen bakımından fakir ve bakteriyel bir ortama maruz kalması sonucu korozyona uğradığı söylenebilir.

Ayrıca korozyona uğrayarak bozunan ve işlevselliğini kaybeden boruların incelenmesi sonucunda da homojen dağılımlı korozyonun yaygın olduğu belirlenmiştir. Aşağıda verilen fotoğraflardan (Res.3-5) da görüleceği gibi bu tür korozyon belirli bölgelerde hızla metal kaybına yol açmakta ve o bölge incelerek sonunda kopmaktadır.

Kaynakla birleştirilen iki borudan birinin homojen dağılımlı korozyona maruz kalarak metal kaybına uğradığı ve sonuçta da kopmuş olduğu görülmektedir. Korozyona uğrayan borunun normalde 4 mm olması gereken et kalınlığı yapılan ölçümlere göre 0.5-1 mm'ye kadar düşmüş olduğu saptanmıştır (Res.5). Aynı ortamda bulunan ve birbirine birleştirilmiş borulardan sadece birinin homojen dağılımlı korozyona uğramasının olası nedeni yüzey kaplamasındaki bozunmadır. İzolasyon maddesi ile kaplanarak toprak altına yerleştirilen karbon çelik (St 37) boruların kaplamalarında meydana gelen yırtılma veya bozunmalar, boruların toprak, bakteri ve nem gibi korosiv ortamlarla direk temas etmesine ve homojen olarak korozyona uğramalarına neden olurlar.



Resim 3. Homojen dağılımlı korozyona uğramış boru parçası



Resim 4. İncelerek kopan boru parçası



Resim 5. Kopan boru ucu

Öneriler:

1. Homojen dağılımlı korozyonun yol açtığı metal kaybı diğer korozyon türlerine oranla çok yüksek olmasına rağmen kontrolü daha kolaydır. Bunun için korosiv ortamlarda kullanılacak malzemelerin korozyon hızları basit deneyler ile saptanarak ömürleri tayin edilmelidir [21].
2. Yüzey kaplamaları, katodik koruma ve korosiv ortama ilave edilen korozyon hızını sınırlayıcı maddeler gibi koruma yöntemleri uygulanmalıdır.
3. Tesisat döşenirken uygun izolasyon kaplama malzemesi kullanılmalı ve bu kaplamaların yırtık ve delik olmamasına dikkat edilmelidir.

Çukurcuk Korozyonu:

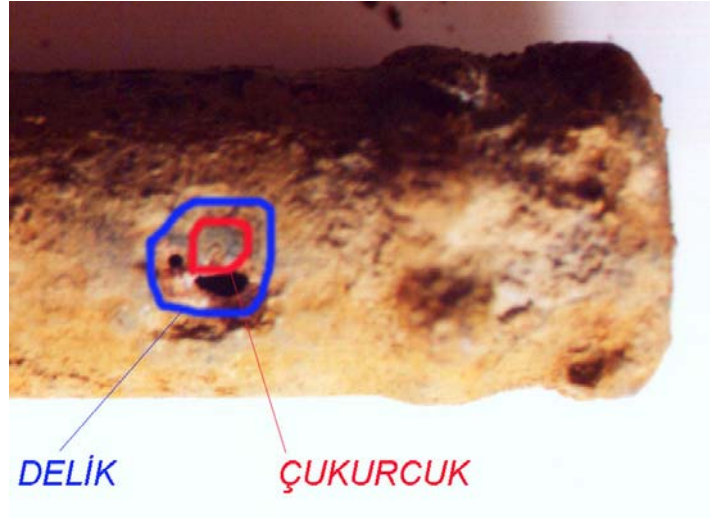
Lokal metal kaybı sonucu oluşan çukurcuk korozyonunun Balçova Jeotermal sisteminde en çok rastlanan bir korozyon türü olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen pek çok boru, dirsek ve bağlantılarda

boyutu oldukça büyük çukurcuklar saptanmıştır. Aşağıda verilen fotoğraflar (Res.6-10) oluşan çukurcuk korozyonu büyüklüğü hakkında yeterince bilgi vermektedir.

Ucu kapalı iki adet boru incelenmiş ve borulardan birinin uç kısmına yakın bölgesinde iki adet delik görülmüştür. Delik çevresi temizlendikten sonra yapılan makro-yüzey incelemesine göre deliklerin çukurcuk korozyonu sonucu oluştuğu saptanmıştır (Res.6). Et kalınlığı 4 mm olan borunun bu bölgesi 1.3 mm'lik metal kaybına uğramıştır. Korozyon sonucu oluşan çukurcuklardan iki tanesi borunun delinmesine neden olmuştur. Korozyona uğrayan bölgede bir adet çukurcuk daha gözlenmiştir (Res.7). Bu da borudaki bu deliklerin parça yüzey hatalarından değil çukurcuk korozyonu sonucu olduğunu belirler.



Resim 6. Çukurcuk korozyonu sonucu boruda oluşan delik



Resim 7. Deliğin hemen yanında oluşan çukurcuk korozyonu



Resim 8. Çukurcuk korozyonu sonucu oluşan delik



Resim 9. Dirsekte oluşan delik

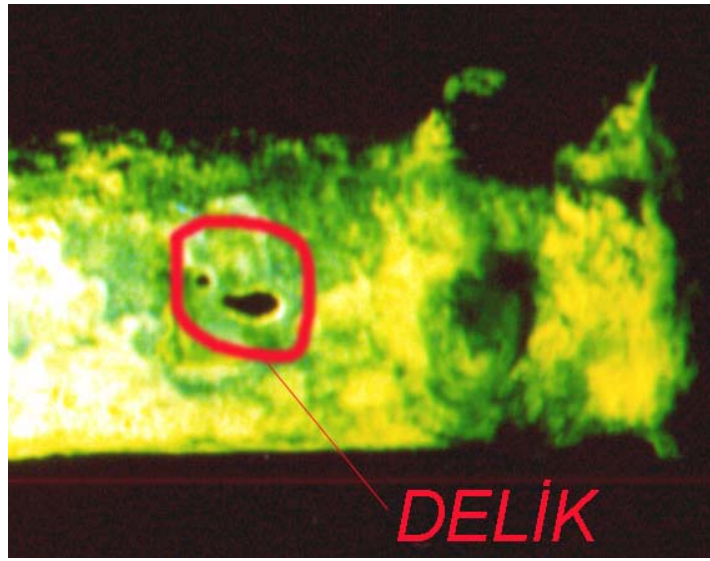


Resim 10. Diğer bir dirsekte oluşan delik

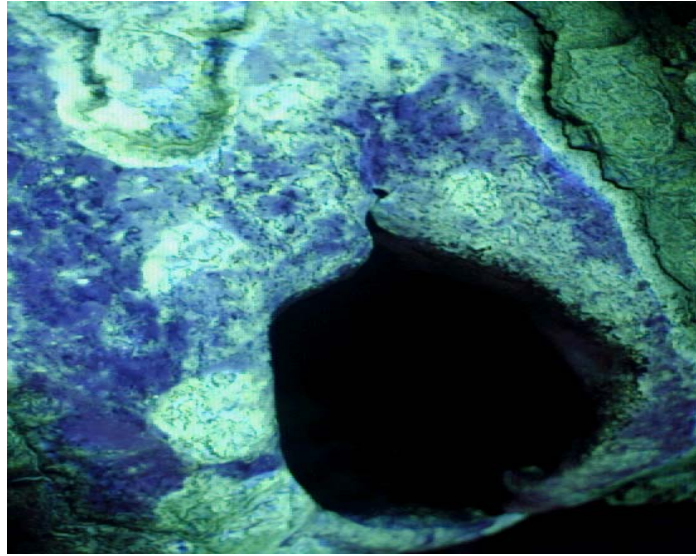
Boru ve dirseklerde görülen deliklerin çukurcuk korozyonu veya gerilmeli korozyon çatlakları sonucunu oluşturduğunu belirlemek için tahribatsız muayene yöntemlerinden sıvı penetrant testi kullanılarak bu deliklerin kenarlarında çatlak incelemesi yapıldı. Tablo.12'de verilen parametrelere göre yapılan sıvı penetrant test sonucuna göre bu deliklerin kenarlarında herhangi bir çatlak saptanmadı (Res.11-13).

Tablo 12. Sıvı Penetrant Test Parametreleri

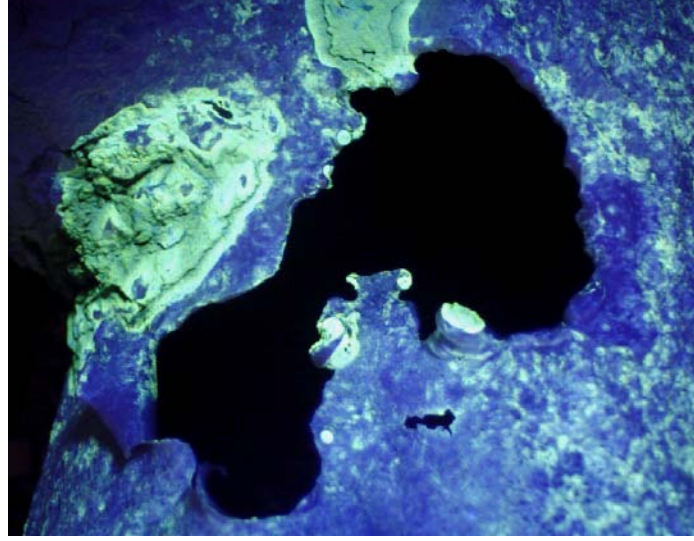
Ön temizleme	Aseton
Sıvı Penetrant sıvısı	Fluoresan Penetrant
Penetrasyon süresi	5 dakika
Ara temizleme	Su
Geliştirici uygulama süresi	5 dakika
İnceleme	UV-ışık



Resim 11. Delik ve çukurcuk korozyonu bölgesinin (Res.6) sıvı penetrant test sonucu



Resim 12. Delik etrafının (Res.8) sıvı penetrant test sonucu



Resim 13. Delik etrafının (Res.9) sıvı penetrant test sonucu

Öneriler:

1. Çukurcuk korozyonu, genellikle klor ve brom iyonları içeren nötr ortamlarda oluşur. Klor iyonları pasif tutumu sağlayan yüzey tabakasının içine sızarak metalin o yerlerde aktif duruma geçmesini sağlayarak metalin o noktalarda hızla çözünmesine ve çukurcuklara neden olur. Bundan dolayı, ortamda çözünmüş oksijen miktarını artırıcı önlemler alınmalıdır. Bu boruların döşendiği yerler gözönüne alınırsa, oksijen geçirimini engelleyecek büyük taş parçaları veya bakterilerin boruyla direk temas etmemesi sağlanmalıdır [21].
2. Kaplama yapılmadan bırakılan bu boru uçlarında da kaplama yapılmalıdır.
3. Yüzey yalıtkan malzemesinin local bozulmasını önlemek gerekir.

Gerilimli Korozyon Çatlakları:

Gerilimli korozyon çatlakları genelde iki farklı malzemeden yapılmış ve termal genişmeden dolayı sürekli yük altında bulunan kompansatörlerde saptanmıştır. İç silindir ve dış silindir malzemesi St 37 karbon çelik, iç silindirin hareket ettiği gömlek ise 316L paslanmaz çelik (Tablo.13) olan kompansatörde oluşan asıl hata gömlekteki ondülün kısmının gerilimli korozyon çatlakları nedeniyle yırtılmasıdır.

Yapılan makro-yüzey incelemesine göre görülemeyen, ancak kompansatörde ondülün kısmının yırtılmasına sebep olan gerilimli korozyon çatlaklarının olası nedenleri [21,22];

1. Klor iyonu içeren ortamlarda yüksek sıcaklıklar (>50°C)
2. Ondülün kısmında termal gradient farklarından dolayı oluşan termal genişmelerin yarattığı gerilimler
3. Ondülün kısmının üretimi aşamasında soğuk şekillendirmenin yarattığı içgerilimler
4. Kabuklaşma aşamasından sonra başlayan korozyon sonucu oluşan çukurcukların diplerinde oluşan mekanik gerilim yoğunlaşması.

Tablo 13. St 37 karbon çeliği ve 316 L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
St 37	0.10	0.4	0.25	0.45	0.45	-	-	-
316 L	0.12	1.5	2.0	-	-	18-20	9-12	2-3

Öneriler

1. Klor iyonu içeren ortamlarda östenitik paslanmaz çeliklerin gerilimli korozyonla çatladıkları görülür¹. Bunun için, aşağıda belirtilen üretim parametreleri kontrol edilmeli ve bu parametrelere uymayan kompensatörler sistemde kullanılmamalıdır.
 - Östenitik paslanmaz çeliklerde, içerilen serbest karbonun kromla birleşerek krom karbürüne dönüşmesi sonucu ortaya çıkan ve tane sınırları korozyonuna neden olan krom karbürleri parçalamak için, çelik üretim aşamasında 1050-1100°C sıcaklıktan hızla soğutulmalıdır.
 - Soğuk şekillendirme sonucu çelik içinde kalan gerilimler bu tür çatlaklara yol açacak yüksekliğe ulaşabildiklerinden, ısıtılma işleminin karbür ayrışımına yol açmayacak sıcaklıklarda (870°C ve üstü) yapılması gereklidir.
 - Gerilimli korozyon çatlama duyarlılığı, artan nikel miktarı ile azaldığından, nikel oranı yüksek nikel-krom-demir alaşımları kullanılmalıdır.
2. Toprak altına yerleştirilen bu tür kompensatörlerde ve borularda katodik koruma yapılmalıdır.

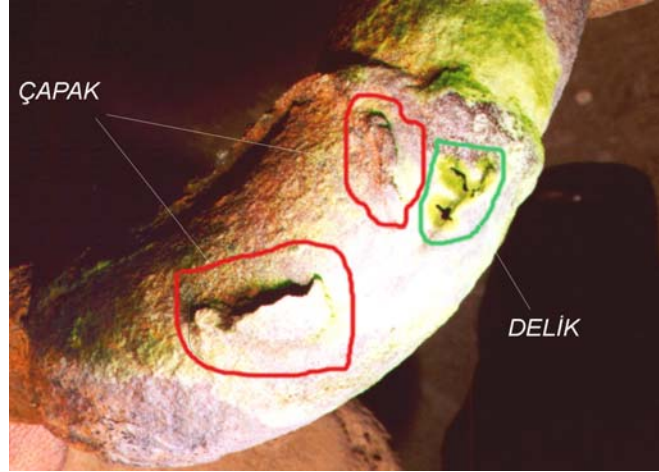
Ayrıca üretim veya montaj sırasında yüzeyde oluşan sıcak yırtılma, ezik veya çapaklarda termal genişleme farkından dolayı yüzeyde gerilimli korozyon çatlaklarına neden olur. Örneğin iki boruya kaynakla birleştirilen dirseğin (Res.14) yüzeyinde hatalı üretimden dolayı oluşan çapaklar ve ezilme görülmüştür. Ayrıca ezilen kısımda sıcak yırtılma sonucu oluşan çatlakların toprakaltında korozyona uğrayarak dirseğin delinmesine neden olduğu görülmüştür.

Bu hataların nedenleri;

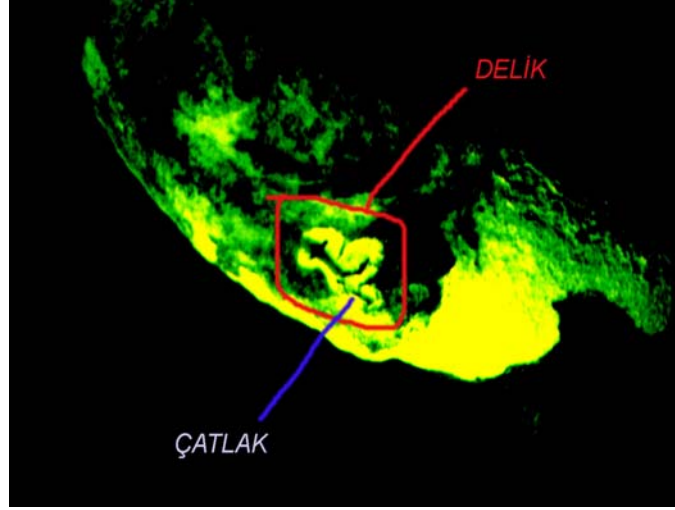
1. Dirsek malzemesi, döküm aşamasında kalıplamanın hatalı yapılmasından dolayı hatalı olarak üretilmiş ve böylece yüzeyinde çapaklar ve ezilme meydana gelmiştir. Normalde 4-5 mm olması gereken malzeme et kalınlığı ezilmenin olduğu bölgede 1 mm kadar inmiştir. Döküm sırasında bu bölgede oluşan sıcak yırtılma toprak altında gerilimli korozyona uğrayarak delinmelere yol açmıştır.
2. Ezilen bölgeye uygulanan sıvı penetran testi (Tablo.12) sonucuna göre, bu deliklerin sıcak yırtılmadan dolayı oluşan çatlakların ilerlemesinin gerilimli korozyon sonucu olduğu saptanmıştır. Resim 15'de de görüldüğü gibi delikler çatlak görüntüsü şeklinde ilerlemişlerdir. Test bölgesinin ultraviyole ışık altında incelenmesi sonucuna göre ise çatlakların delik çevresinde doğrusal olarak devam ettiği belirlenmiştir (Res.16).



Resim 14. Dirsek yüzeyinde görülen ezilme, çapak ve delik



Resim 15. Sıvı penetrant test sonucu



Resim 16. Yüzeyle ilgili gerilimli korozyon çatlaklarının ultraviyole ışık altındaki Görünümü

Öneriler:

1. Üretim aşamasında hatalı parçaların kalite kontrolünün yapılması,
2. Kalite kontrolden geçmemiş parçaların satın alınmaması,
3. Tesisat döşenirken hatalı üretilen parçaların kullanılmaması,
4. Kaynak işlemi sonrası yine uygun bir yöntemle kalite kontrolünün yapılması gerekmektedir.

JEOTERMAL SİSTEMLERİN KURULMASI, KOROZYON KONTROLÜ VE İNCELEMESİ İÇİN ULUSLARARASI STANDARTLAR

Bu bölümde jeotermal sistemlerin kurulması, korozyon kontrolü ve işletim sırasında yapılması gereken inceleme yöntemlerine ait uluslararası standartlar verilmiştir [25].

Jeotermal kuyuların açılması ve işletilmesi ile ilgili standartlar genelde Amerikan Petrol Enstitüsü (API), NACE Uluslararası Malzeme önerileri ve Amerikan Malzeme Test Kuruluşunun (ASTM) satandartlarını kapsamaktadır. Bu standartların numaraları ve isimleri aşağıda verilmiştir:

- NACE MR-0175-95 Sülfat Gerilimli Çatlaklara Dayanımlı Metalik Malzemeler
- API Bull 5C3 Durum değerlendirme, Sondaj ve Boru döşeme
- API Spec. 5D Sondaj açma Kuralları
- API Spec. 5L Boru Döşeme Kuralları
- ASTM A53 Çelik kaynağı ve dikişsiz boru Standartı
- ASTM A106 Yüksek sıcaklıkta kullanılan dikişsiz karbon çelik boru Standartı
- API Spec. 6A Vanalar ve Kuyubaşı Cihazlar için Kurallar
- API Spec. 6D Boruhattında kullanılan Vanalar için Kurallar

Korozyon hızı ölçümü ve korozyon türlerini saptamada kullanılan standartlar:

- ASTM G-1 Korozyon test parçalarını hazırlama, temizleme ve değerlendirme
- ASTM G-4 Sahada korozyon kupon testi
- ASTM G-28 Kaba, nikelce zengin ve kromca zengin alaşımların tanelersarı korozyon eğilimlerini belirleme
- ASTM G-30 U-eğimli gerilim korozyon test parçası hazırlama ve kullanma
- ASTM G-46 Çukurcuk korozyonu testi ve değerlendirilmesi
- ASTM G-48 Demir klorid solüsyonu kullanarak paslanmaz çelik ve ilgili alaşımların çukurcuk ve aralık korozyon dayanıklarının bulunması
- ASTM G-58 Kaynak dikişleri için gerilim korozyon test parçasının hazırlanması
- ASTM G-71 Elektrot içinde galvanik korozyon ölçümü ve değerlendirme
- ASTM G-96 Aralık korozyon testi
- ASTM G-96 Sahada anında korozyon incelenmesi
- ASTM G-102 Elektro kimyasal ölçümlerle korozyon hızı hesaplanması

Korozyona uğramış jeotermal sistem parçalarının testleri için genelde tahribatsız muayene standartları önerilmiştir:

- ASTM E-1003 Hidrolik sızdırmazlık testi
- ASTM E-1002 Ultrasonik sızdırmazlık testi
- ASTM E-165 Sıvı penetrant testi
- ASTM E-709 Magnetik parçacık testi
- ASTM E-114 Ultrasonik darbe-yankı, doğrusal demet testi
- ASTM E-797 Ultrasonik darbe-yankı, kalınlık ölçüm testi
- ASTM E-1032 Kaynak dikişlerinin Radyografik testi

KAYNAKLAR

- [1] Diczházi, B., Kocsis, J., Marik, J., Szalontay, G., Determination of Scaling and Agressivity Potentials in Geothermal Waters, Vol. 152, Budapest, pp.11-13, 1985.
- [2] Pátzay, Gy, Stahl, G., Karman, F.H., Kalman, E., Modeling of Scale Formation and Corrosion From Geothermal Water, *Electrochimica Acta* 43, pp. 137-147, 1988.
- [3] Godard, H., Corrosion of Metals by Waters. *Materials Performance*, National Association of Corrosion Engineers, pp.21-27, 1979.
- [4] Ellis, P. F. and Conover, M. F.; Material Selection Guidelines for Geothermal Energy Utilization Systems, Radian Corporation, Austin, Texas 1981.
- [5] Maria E. Inman, Roy M. Sharp, Peter T. Wilson and Graham A. Wright, On-line Corrosion Monitoring in Geothermal Steam Pipelines, *Geothermics*, Vol. 27, No.2, pp. 167-182, 1998.

- [6] Dulce R.G., Nogara B.J., Sambrano B.G., Calcite Scale Deposition in Production Wells in Mindanao Geothermal Production Field, Philippines, Geothermal Resources Coun. Trans., Vol. 24, Sept. pp. 24-27, 2000.
- [7] Thomas D., McKibben M., Ruiz M.C., Sulfide Scaling in Cerro Prieto Geothermal Wells, Geothermal Resources Coun. Trans., Vol. 16, October 1992.
- [8] Gabrielli C., Maurin G., Poindessous G., Rosset R., Nucleation and Growth of Calcium Carbonate by an Electrochemical Scaling Process, Journal of Crystal Growth 200, pp. 236-250, 1999.
- [9] Gallup D.L., Aluminum Silicate Scale Formation and Inhibition: Scale Characterization and Laboratory Experiments, Geothermics, Vol. 26, No. 4, pp. 483-499, 1997.
- [10] Gallup D.L., Aluminum Silicate Scale Formation and Inhibition (2): Scale Solubilities and Laboratory and Field Inhibition Tests, Geothermics, Vol. 27, No. 4, pp. 485-501, 1998.
- [11] Gallup D.L., Geochemistry of Geothermal Fluids and Well Scales, and Potential for Mineral Recovery, Ore Geology Reviews 12, pp. 225-236, 1998.
- [12] Gallup D.L., The Interaction of Silicic Acid with Sulfurous Acid Scale Inhibitor, Geothermal Resources Council Trans., Vol. 21, September/October 1997.
- [13] Ignatiadis I., Teton S., Assessment of the Chemical Action of Different Agents on the Iron Sulphide Constituting the Scale Formed by Corrosion of Carbon Steels in Geothermal Environments, Geothermal Resources Council Trans., Vol. 16, October 1992.
- [14] Stahl G., Patzay G., Weiser L., Kalman E., Study of Calcite Scaling and Corrosion Processes in Geothermal Systems, Geothermics 29, pp. 105-119, 2000.
- [15] Batis G., Kouloubi N., Kotsakou K., Corrosion and Protection of Carbon Steel in Low Enthalpy Geothermal Fluids. The Case of Sousaki in Greece, Geothermics, Vol. 26, No. 1, pp. 65-82, 1997.
- [16] Knipe E.C., Rafferty K.D., Corrosion in Low-Temperature Geothermal Applications, Ashrae Trans., Vol. 91, Pt.2.
- [17] Lineau, P. J. and Rafferty, K., Piping Geo-Fluids. Bulletin of the Geo-Heat Center 9(3), pp.5-8, 1986.
- [18] Gautier, B. and Goyeneche, O., La Prevention de la Corrosion en Geothermie, Reseaux et Chaleur 5, pp. 57-63, 1990.
- [19] Thorhallsson, S., Experience in Developing and Utilizing Geothermal Resources in Iceland. *Geothermics* 17, pp. 205-223, 1988.
- [20] Corsi, R., Scaling and Corrosion in Geothermal Equipment: Problems and Preventive Measures, *Geothermics* 15, pp. 839-856, 1986.
- [21] H.Uhlig, "Corrosion and Corrosion Control", John Wiley, 1971.
- [22] Boyer H.E., Gall T.G., "Metals Handbook", Desk Edition, ASM, 1992.
- [23] Moller G.E., Standardization in Construction, Corrosion Control and Inspection of Geothermal Power Plants, Geothermal Resources Council Trans., Vol. 19, October 1995.

ÖZGEÇMİŞ

Hacer AYGÜN

1985 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Bölümünden mezun olmuştur. Aynı bölümde 1988'de Master, 1996'da Doktora çalışmalarını tamamlamıştır ve 1998 yılına kadar araştırma görevlisi ve daha sonra Dr.uzman olarak çalışmıştır. 1989-1992 yılları arası Fedaral Alman Malzeme Araştırma ve Test Enstitüsünde Tahribatsız Muayene konularından Ultrasonik test, Sıvı Penetrant testi, Magnetik parçacık testi ve Radyografik test yöntemlerinden 3. Seviye Sertifikalarını almış ve doktora çalışmalarını aynı enstitüde tamamlamıştır. Halen İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümünde Yrd.Doç.Dr. olarak çalışmaktadır. 2000-2003 yılları arasında Böl.Bşk. Yardımcılığı yapmıştır. Korozyon, Tahribatsız Muayene Laboratuvarlarını oluşturarak Korozyon, Kalite Kontrol, Tahribatsız Muayene ve Döküm konularında çalışmalarını sürdürmektedir.