



Batı Anadolu'da Yüksek Sıcaklıklı Jeotermal Sistemlerde Gözlenen Kabuklaşma Türleri ve Kabuklaşma Oluşumunun Kontrolünün Sağlanmasında Kullanılan Sistemler; Kızıldere-II (Denizli) Jeotermal Güç Santrali Örneği
Scaling Types and Systems Used to Provide Controlling of Scale occurrence in High Temperature Geothermal Systems in Western Anatolia; Kızıldere-II (Denizli) Geothermal Power Plant Example

Fusun Servin Tut Haklıdır 

*Istanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Santral Kampüsü, Eyüp-İstanbul*

Geliş/Received : 11.04.2017 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received : 26.05.2017 • Kabul/Accepted : 09.06.2017 • Baskı/Printed : 01.08.2017

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Jeotermal güç üretimi su baskın rezervuarların derin zonlarından gelen orta-yüksek sıcaklıktaki akışkanlardan elde edilmektedir. Bu sistemlerde sıvı fazda termodinamik değişimlerin kontrolüyle jeotermal akışkan üzerinde sıcaklık ve basıncın etkilerinin izlenmesi jeotermal sistemlerin sürdürülebilirliğinin sağlanması bakımından oldukça önem arz etmektedir.

Bir jeotermal sistemde rezervuar kayaların türleri, su-kaya etkileşimleri ve jeotermal akışkanın kompozisyonuna yönelik sağlıklı bilgi elde edilmesi jeotermal güç/ısı sistemlerinin işletilmesi sırasında karşılaşılabilecek kabuklaşma, korozyon gibi problemlerin önlenmesinde önemli olacaktır.

Türkiye’de keşfedilmiş jeotermal sistemler su baskın rezervuar tipindedir. Türkiye’deki en büyük iki graben sistemi olan Büyük Menderes ve Gediz Grabenlerinde orta-yüksek sıcaklıktaki jeotermal sahalardan üretim yapan 30’un üzerinde jeotermal enerji santrali bulunmaktadır. Bu jeotermal sistemlerde, sistem performansını doğrudan etkileyen kalsit, silika türünde kabuklaşmalar gözlenmektedir. Güç santrallerinin üretim dönemlerinde bu kabuklaşma problemlerinin önlenmesi amacıyla jeokimyasal testler ve jeokimyasal modellemeler yapılmaktadır. Bir jeotermal sistemin sürdürülebilir olması, kabuklaşma tiplerinin belirlenmesine, uygun kabuklaşma engelleyici inhibitörlerin seçimine ve inhibitör sistemlerinin doğru noktalara kurulmasına doğrudan bağlıdır.

Bu çalışmada, Batı Anadolu’daki orta-yüksek sıcaklıktaki jeotermal rezervuarların jeolojisine bağlı olarak farklı tip jeotermal santrallerde üretilen akışkanların kabuklaşma eğilimleri ve etkin kabuklaşma engelleme metodları Kızıldere-II (Denizli) jeotermal güç santrali örneğinde test edilerek tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batı Anadolu, güç santrali, inhibitör, jeotermal enerji, kabuklaşma, rezervuar jeolojisi

Abstract: *Geothermal power generation has been generally provided by moderate-high temperatures fluids at deep geothermal zones in water-dominated reservoirs. For these systems, controlling of thermodynamically changes of liquid phase and monitoring of temperature and pressure effects on geothermal fluids have great importance to provide of geothermal system sustainability.*

In a geothermal system, to provide a good information on reservoir rocks types, water-rock interaction and geothermal fluids composition will be important to prevent some problems such as; scaling, corrosion etc. during operational stage of geothermal power/heat systems.

The discovered geothermal systems have water-dominated type in Turkey. Büyük Menderes Graben and Gediz Graben are two of the largest graben systems in Turkey and there are more than 30 geothermal power generation systems on these moderate-high temperatures geothermal fields along these graben systems in Western Anatolia. All these geothermal systems have scaling problems such as calcite and silica and they directly affect performance

of the geothermal energy systems. To prevent these problems geochemical modeling studies and geochemical tests have been performed before operational stage of power generation systems. Sustainability of the system directly depends on determination of scaling types, selection suitable scale inhibitors and installation of inhibitor systems for a geothermal system.

In this study, scaling tendency of geothermal fluids depends on reservoir geology and the most effective scale prevention methods at different type geothermal power plants have been discussed for moderate-high geothermal temperature reservoirs in Western Anatolia and Kızıldere-II (Denizli) Geothermal Power Plant has selected as a case study to explain importance of suitable methods to prevent scaling.

Key Words: *Western Anatolia, power plant, inhibitor, geothermal energy, scaling, reservoir geology*

GİRİŞ

Yerin derinliklerindeki rezervuarlarda yerin ısı ile ısınmış jeotermal akışkanın (su, buhar + gaz) farklı sondaj teknikleriyle yüzeye çıkarılarak, bu akışkanın enerji üretimi, konut ve sera ısıtması, kaplıca ve kurutma gibi farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılması, jeotermal enerjinin özellikle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olmasını sağlamaktadır.

Jeotermal rezervuarlarda su baskın veya buhar baskın sistemleri oluşturan jeotermal akışkanların özellikleri, yerin derinliklerinden, yeryüzüne ulaşmaya kadar, özellikle değişen basınç (P) ve sıcaklık (T) parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (DiPippo, 2016).

Türkiye’de olduğu gibi ağırlıklı olarak su baskın olarak gözlenen jeotermal sistemlerde, akışkanın üretiminden re-enjeksiyonla yeraltına geri basımının gerçekleştirildiği süreç boyunca değişen P ve T koşullarına bağlı olarak, akışkan bünyesindeki minerallerin duraylılıkları değişmektedir (Haizlip Robinson vd. 2013). Değişen bu termodinamik koşullar jeotermal akışkanın temas halinde olduğu ısı merkezleri ve güç sistemlerinin farklı kısımlarında kabuklaşma ve korozyon gibi etkiler oluşturarak, bu tesislerin işletilmesinde ciddi zorluklara ve finansal kayıplara neden olmaktadır.

Türkiye, önemli tektonik zonların ve genç volkanizmaların etkisinde bulunmakta olup (Şekil 1), bu yapılar jeotermal kaynakların oluşabilmesi için gerekli ısıtıcı kaya ve rezervuar kayaların

oluşmasına ve bu rezervuarlardaki akışkanların faylar vasıtasıyla yeryüzüne ulaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Nicholson, 1993). Türkiye genelinde halen 230 keşfedilmiş jeotermal saha bulunmakta olup, en yüksek sıcaklıktaki sahalardan elde edilen jeotermal akışkanlar Batı Anadolu’da ağırlıklı olarak enerji üretiminde ve ısıtmada, düşük sıcaklıkta olanlar ise Orta Anadolu’da ısıtma ve kaplıca, Doğu Anadolu’da ise ağırlıklı olarak kaplıca uygulamalarında kullanılmaktadır (Mertoğlu vd. 2015).

Dünya genelinde jeotermal enerjiden elektrik üretimi 13.3 GWe’ı aşmış durumdadır (GEA, 2016). 2010 yılından önce jeotermal enerji potansiyeli MTA tarafından 31.500 MWt olarak tahmin edilen Türkiye’de, özellikle son beş yılda jeotermal arama çalışmalarına özel sektörün de yatırım yapmaya başlamasıyla, yeni keşfedilen sahalardan elde edilen akışkanlarla mevcut kapasitenin iki katına çıkması öngörülmektedir (Mertoğlu vd. 2015). Türkiye’de halihazırda 33 güç santralinden sağlanan 856 MWe olan kurulu güç kapasitesi (EPDK, 2017) ve jeotermal akışkanın doğrudan kullanıma yönelik yaklaşık 2887 MWt kapasite bulunmaktadır (Mertoğlu vd. 2015). Türkiye’nin 10. Kalkınma Planı’na göre; 2018 yılı jeotermal enerji kurulu güç kapasite hedefi 750 MWe güç ve ısı kapasitesi 4000 MWt olarak belirlenmiş olup, bu kurulu güç hedefi 2016 yılında aşılmıştır (T.C. 10. Kalkınma Planı, 2013).

Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üreten güç santralleri arasında kapasite faktörlerinin yüksekliği nedeniyle ön plana

çıkan jeotermal santrallerinin sürdürülebilir olması ve tam kapasitede enerji üretimini uzun süre koruyabilmesi ise, ancak uygun işletme koşullarıyla mümkündür. Bu amaçla, santrallerin optimize edilerek, rezervuar işletme planları yapılarak ve üretimi etkileyecek faktörlerin göz önünde bulundurularak çalıştırılması gerekmektedir.

TÜRKİYE'DE KEŞFEDİLMİŞ YÜKSEK SICAKLIKLI JEOTERMAL SİSTEMLERİN DAĞILIMI

Türkiye jeotermal kaynak potansiyeli bakımından dünyada önde gelen ülkelerden biridir. 1960'ların başında Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA) tarafından başlatılan jeotermal kaynak arama çalışmaları 2000'li yıllardan sonra hız kazanmış ve sadece 2010-2015 dönemi boyunca MTA ve özel sektör tarafından derinlikleri 2800 m'yi aşan 320'nin üzerinde araştırma, üretim ve re-enjeksiyon amaçlı jeotermal kuyu açılmıştır (Mertoğlu vd. 2015; Haklıdır Tut vd. 2015).

Jeotermal sistemlerin oluşması için gereken koşulların oluşmasına olanak sağlayan Alp-Himalaya orojenezine bağlı oluşan Ege Açılma Zonu, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu Fay Zonu gibi farklı tektonik kuşaklar boyunca (Bozkurt, 2001) genç volkanizmanın da etkisiyle (Doglioni vd. 2002) Türkiye'de oldukça değişken jeotermal rezervuar sıcaklıkları gözlenmektedir (Mutlu ve Güleç 1998).

Ülkemizde keşfedilmiş, özellikle elektrik üretimine uygun orta-yüksek sıcaklıklı jeotermal

sahalar (150 °C ve üzeri) Batı Anadolu'da bulunmaktadır (Tarcan, 2005). Su-baskın jeotermal rezervuarların bulunduğu bu bölgede, jeotermal akışkan sıcak su, buhar + yoğuşmayan gaz fazlarından oluşmaktadır. Ege Açılma Zonu'na bağlı olarak gelişen kabuk incilmesi sonucunda jeotermal gradyanın yüksek olarak gözlemlendiği (Tezcan, 1979) graben yapılarına bağlı fay sistemleri, mevcut jeotermal akışkanlara sondajlarla nispeten ekonomik olarak erişmeyi olanaklı kılmaktadır. Batı Anadolu'da elektrik üretimine uygun keşfedilmiş orta-yüksek sıcaklıktaki sahalara özellikle Büyük Menderes Grabeni (Büyük Menderes Jeotermal Grabeni), Gediz Grabeni, Simav Grabeni boyunca gözlenmekte olup, Tuzla (Çanakkale) ve Seferihisar (İzmir)'de de elektrik üretimine uygun sahalara mevcuttur. Özellikle Büyük Menderes Grabeni üzerinde Aydın-Denizli şehirleri arasında ülkemizin en yüksek sıcaklıklı jeotermal rezervuarları (240-245 °C'ye ulaşan sıcaklıklar; Haizlip vd. 2016) bulunmakta olup, sadece bu graben üzerinde 2017 itibarıyla 30 üzerinde jeotermal santral işletmeye alınmıştır. Gediz Grabeninde de 200 °C ve civarı jeotermal rezervuar sıcaklıkları gözlenmekte olup, özellikle Alaşehir-Manisa bölgesinde devreye alınmış ve kurulum aşamasında olan farklı projeler bulunmaktadır. 2017 itibarıyla sadece Batı Anadolu Bölgesindeki jeotermal enerji elektrik santral kurulu gücü 856 MWe olup, bu rakam ülkedeki enerji üretiminin hali hazırda % 2'sine denk gelmektedir (EPDK Raporu, 2017).



Şekil 1. Türkiye'deki ana tektonik zonlar (EAZ: Ege Açılma Zonu, KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, KDAFZ: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu, BZSZ: Bitlis-Zagros Sütür Zonu, BKFZ: Büyük Kafkaslar Fay Zonu, KKFZ: Küçük Kafkaslar Fay Zonu, ÖFZ: Ölü Deniz Fay Zonu (Ketin, 1966, Dewey ve Şengör, 1979, Şengör, 1982'den düzenlenerek; Haklıdır Tut, 2007)

Figure 1. Major tectonic zones of Turkey (EAZ: Aegean Extension Zone, KAFZ: North Anatolian Fault Zone, KDAFZ: Northeast Anatolia Fault Zone, BZSZ: Bitlis-Zagros Suture Zone, BKFZ: Main Caucasians Fault Zone, KKFZ: Small Caucasians Fault Zone, ÖFZ: Dead Sea Fault Zone (Ketin 1966, Dewey and Şengör, 1979, modified after Şengör, 1982; Tut Haklıdır, 2007)

TÜRKİYE'DE KULLANILMAKTA OLAN ORTA-YÜKSEK SICAKLIKTAKİ AKIŞKANLARDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETME TEKNOLOJİLERİ

Jeotermal kaynaklardan, rezervuar tipleri ve sıcaklıklarına göre, enerji üretiminde farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Rezervuar tiplerine göre su baskın ve buhar baskın sistemlerde direkt buharın kullanımına dayalı kuru buhar santralleri kurularak enerji üretilirken, su baskın sistemler için daha farklı seçenekler bulunmaktadır. Su baskın rezervuarlarda akışkan sıcaklığı, yoğunlaşmayan gaz (CO_2 , H_2S gibi) oranları, kurulması planlanan güç santralının kapasitesi ve yatırım için ayrılan

bütçeye bağlı olarak değişebilecek, enerji verimliliğinin en yüksek düzeyde kullanılmasına olanak sağlayacak jeotermal güç santrali tasarımları mümkün olabilmektedir. Bu santral tiplerinden ilki $< 200^\circ\text{C}$ akışkan sıcaklığı için daha düşük kapasiteli ve kompakt olan akışkanın kapalı bir çevrimde, kaynama noktasının düşürülerek, n-pentan, n-bütan tipinde organik bir akışkanın varlığında daha fazla buhar elde edilmesine olanak sağlayan organik rankine çevrim tipinde ikili (binary) sistemlerdir. Diğer santral teknolojisi ise; daha yüksek rezervuar sıcaklıklarında kuyudan tek faz halinde gelen akışkanın seperatör adı verilen buhar ayırıcı sistemlerde buhar ve su olarak ayrılarak, buhar kısmının buhar türbinine

iletildiği flaş sistemlerdir. 220 °C'yi aşan akışkan sıcaklıklarında çoklu-flaş (buhar ve su fazının yüksek basınç, düşük-orta basınç seperatörleri vasıtasıyla kademeli olarak birbirinden birkaç kez ayrılabilirdiği) sistemleri ve ileri jeotermal sistemler olarak ifade edilen flaş ve ikili (binary) çevrimlerin birlikte kullandığı sistemlere yerini bırakmaktadır (DiPippo, 2016).

Batı Anadolu'da işletmede ve kurulum aşamasında olan jeotermal enerji santrallerinde kullanılan çevrimler farklılık göstermektedir. Rezervuar sıcaklıkları < 200 °C ve kapasiteleri genel olarak < 25 MWe olan santraller daha kompakt ikili (binary) tipte olup, enerji üretimi için organik rankine çevrim teknolojisi kullanılmaktadır. Ağırlıklı olarak Germencik, Salavatlı, Pamukören (Aydın) ve Alaşehir (Manisa)'da işletilen bu santraller halihazırda toplam kurulu gücün yarısından fazlasını oluşturmaktadır.

Rezervuar sıcaklıkları > 200 °C olan ve buhar türbini teknolojisi kullanılan flaş tipteki santraller ise; Germencik- Aydın (ikili flaş sistemler), Kızıldere-Denizli (tekli flaş çevrim ve üçlü flaş+ binary çevrim), Alaşehir-Manisa'da (ikili flaş + binary sistem) kurulmuştur. İki farklı enerji çevrimin kullanıldığı enerji sistemleri, enerji verimliliğinin artırılması ve santrallerin iç tüketimlerinin düşürülmesi amacıyla bazı yatırımcılar tarafından dünyada ve Türkiye'de kullanılmaktadır.

İkili, flaş ve çoklu flaş sistemleriyle elektrik üreten enerji santrallerinde akışkan ve elektrik üretimlerinin kesintisiz ve sürdürülebilir olabilmesi, jeotermal akışkanın üretim kuyusundan yüzeye çıkmasıyla başlayıp, buharı alınmış atık akışkanın re-enjeksiyon kuyularına iletilmesine dek ilerleyen süreçte, akışkanın farklı sıcaklık, basınç ve pH ortamlarında korozyon ve kabuklaşma oluşturma potansiyeli, oluşabilecek bu kabuklaşma tiplerinin her jeotermal sistem için kendine özgü olduğunun anlaşılmasına ve buna göre araştırma yapılmasına direkt olarak bağlıdır.

Su baskın jeotermal rezervuarlarda, derindeki akışkanın yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında etkin su-kaya etkileşimiyle mineral içeriği zenginleşmektedir. Bir üretim kuyusunda akışkanın yüzeye rezervuar koşullarındaki yüksek basınç koşulları nedeniyle tek faz olarak ilerlerken, kuyu içinde su ve buhar (+gaz) olarak iki faza ayrılmaya başladığı kaynama noktasına ulaşıp, P_{CO_2} düşmesi ile başlayan ilk mineral çökelişi $CaCO_3$ ağırlıklı olmaktadır. Yüzeye çıkan akışkanın, sistem tasarımına bağlı olarak, jeotermal borular içinde ilerlerken dirseklerde, vana arkalarında, buhar ve su fazının buhardan ayrıldığı seperatör sistemlerinde, çoklu flaşlı sistemlerde her seperatör sistemi sonrasında; basınç düşümünün gözlemlendiği her noktada $CaCO_3$ minerali çökelişi ve sistemde akışkan sıcaklığının düşümünün gözlemlendiği noktalardan silika veya Al, Mg silikatlı minerallerin çökelişi gözlenmektedir (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016). Buna ilaveten ikili çevrimli sistemlerde ısı değiştirmek için kullanılan eşanjör sistemlerinde sülfürlü çökelimler de gözlemlenmektedir. Minerallerin farklı sıcaklık, basınç ve pH koşullarında doygunluklarının farklı olmasından kaynaklanan bu kabuklaşmalar gerek üretim, re-enjeksiyon kuyularından ve hatlarında, gerekse diğer yüzey ekipmanlarında (separatör sistemleri, türbin kanatları, vanalar gibi) oluşabilmekte ve kuyudan elde edilecek akışkan üretimlerini kısa sürede düşürmekte ve yüzey ekipmanlarının tıkanarak, sistemin performansının hızla düşmesine neden olmaktadır (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016).

JEOTERMAL KABUKLAŞMA OLUŞUMUNA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Su baskın jeotermal rezervuarlardan üretim yapan jeotermal güç santrallerinde ve ısı merkezlerinde sistem performansını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biri, akışkanın içinde çözülmesi bulunan iyonların termodinamik koşullara bağlı olarak çökme eğilimini ifade eden kabuklaşmadır.

Özellikle yüksek sıcaklıklı jeotermal rezervuarlarda, akışkan ve kayaların yüksek basınç ortamında etkileşimde olmaları, minerallerin çözünerek jeotermal akışkanın toplam çözünmüş madde miktarının artmasına yol açmaktadır. Çözünen mineraller belirli termodinamik koşullarda duraylıdır, ancak bu koşulların değişmesiyle mineraller akışkanda doymuş hale gelerek çökebilirler.

Bir akışkandaki mineral doygunluğu veya minerallerin termodinamik denge durumu doygunluk indeksi (DI) ile ifade edilir. Termodinamik açıdan dengenin sağlanmadığı durumlarda, akışkandaki gerçek iyonik aktivite ürünü (IAP) çözünme ürüne (Ksp) eşit olamayacaktır (Mutlu, 2009). Bir akışkandaki minerale göre doygunluk durumu olan DI aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$IAP > K_{sp}$ veya $DI = IAP/K_{sp} > 1$ ise mineral aşırı doymuştur,

$IAP = K_{sp}$ veya $DI = IAP/K_{sp} = 1$ ise mineral akışkanda dengededir,

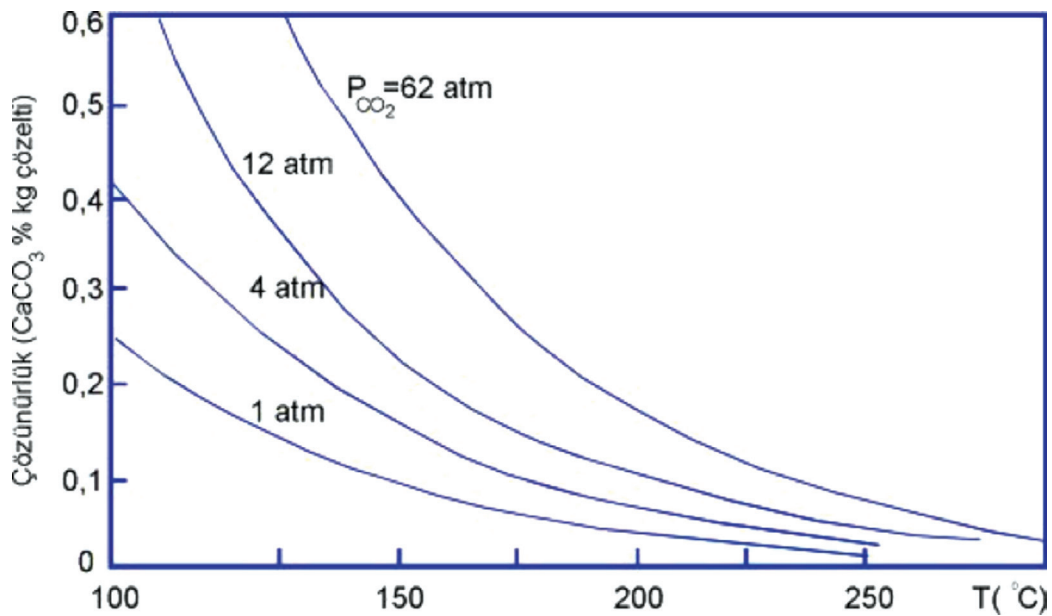
$IAP < K_{sp}$ veya $DI = IAP/K_{sp} < 1$ ise mineral akışkanda çözülüdür.

Jeotermal sistemlerde üretime geçilmeden önce akışkanın kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin ardından WATCH, PHREEQC gibi su modelleme programlarıyla farklı sıcaklıklarda akışkandaki minerallerin kabuklaşma eğilimi tespit edilebilmektedir. Mineral doygunluk indekslerinin işletme koşulları öncesinde hesaplanmasıyla üretim, yüzey ve re-enjeksiyon hatlarında olası

kabuklaşmalar engellenebilmektedir. Söz konusu fiziksel koşulların belirlenmesi (re-enjeksiyona gönderilecek akışkan için uygun sıcaklığın ve pH aralığının belirlenerek, silika minerallerinin çökmesinin en aza indirilmesi gibi) veya gerekiyorsa şartlandırma yapılması kısa test çalışmalarıyla önceden gerçekleştirilmelidir.

Jeotermal akışkandan kaynaklanan kabuklaşma türlerinden en önemlisi üretim kuyuları ve yüzey ekipmanlarında gözlenen $CaCO_3$ çökmesidir. Bunun dışında üretim kuyularında Al-Mg silikatların çökeldikleri de kaydedilmiştir (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016). Diğer önemli bir kabuklaşma türü de akışkan sıcaklığı düştükçe silika formundaki minerallerde gözlenen hızlı çökmedir ve bu durum re-enjeksiyonda daha sık karşılaşılan bir diğer problemdir. Bu iki mineral dışında sülfürlü minerallerin de jeotermal sistemlerde çökeldiği, özellikle barit ($BaSO_4$) ve ikili çevrim jeotermal santrallerde gözlenen stibnitin (Sb_2S_3) örnek teşkil edebileceği belirtilmiştir (Tarcan vd. 2016).

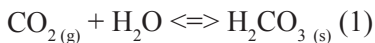
Kalsiyum karbonat jeotermal sularda yaygın olarak bulunan, özellikle kalsit ve aragonit olarak çökelen bir mineraldir. $CaCO_3$ saf suda $25^\circ C$ 'de ancak 14-15 mg/l kadar çözülür. (Schoeller, 1962). Kalsit çözünürlüğünün kısmi karbondioksit basıncı (P_{CO_2}) değişimi ile doğrudan ilgili olması, P_{CO_2} azaldığında CO_2 'nin buhar fazına geçerek, akışkanın pH'sını yükseltmesi ve akışkanın $CaCO_3$ 'e doymuş hale gelmesi ve böylece çökmesine neden olmaktadır (Şekil 2). Karbonat formları değişen pH'a göre suda farklı formlarda bulunmaktadır.



Şekil 2. CaCO₃ çözünürlüğüne basınç ve sıcaklık etkisi (Ellis,1959)

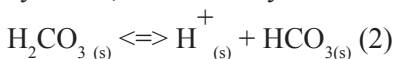
Figure 2. Pressure and temperature effects on CaCO₃ solubility (Ellis, 1959)

Suyun içinde çözünebilen gaz haldeki CO₂ tepkimeye girerek ortamda H₂CO₃ oluşumuna olanak sağlamaktadır (1) (Schoeller,1962; Dramis vd. 1999).

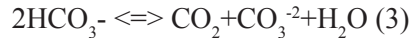


Su içinde çözünme eğiliminde olan gazlar, sistemde basınç arttıkça sıvı içerisinde daha fazla çözülmeye başlayacak, basıncın düştüğü koşullarda çözünmüş olan gaz, kabarcıklar halinde Henry Gaz Çözünürlüğü yasasına uygun olarak serbest kalacaktır. Gazların çözünürlüğünde sıcaklığın etkisi de oldukça önemlidir. Su 0 °C'de 30 °C'deki koşullara oranla üç kez daha fazla CO₂ çözebilmektedir (Schoeller, 1962).

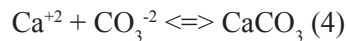
Jeotermal rezervuarda bulunan CO₂'in suda çözünmesiyle ortaya çıkan karbonik asit, iyonlarına ayrılarak, bikarbonat iyonuna dönüşmektedir (2).



Ortam pH'sı değişip, alkalineleştikçe bikarbonat iyonu da aynı şekilde a karbonat iyonuna dönüşmektedir (3).



d) CaCO₃'ün oluşumu



Su baskın rezervuarlarda 3 ve 4 nolu eşitliklerle ifade edilen reaksiyonlarla P_{CO₂}'nin düşmesi (kaynama noktası) ile sistemde rezervuardan yüksek basınç koşullarında tek faz halinde ilerleyen jeotermal akışkan çift faza ayrılarak ortamın pH'sı artırır. CaCO₃ ile dengede olan su ise, hızla aşırı doymun hale gelerek kalsiyum karbonat oluşmasına yol açacaktır. Ortamdaki diğer tuzların mevcudiyeti çözünürlüğü arttırmak suretiyle çökelmeyi bir miktar kontrol edecektir (Tut, 2003).



Jeotermal akışkanda silika minerali çökeltimi ise CaCO₃ çökeltimiyle ters bir işleyişe sahiptir. Silika minerallerinin sistemde çökeltimi akışkan sıcaklığının düşmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu mineraller hızlı sıcaklık düşmesiyle hızla kristalleşerek, sistemde amorf silika olarak çökelebilmektedirler. Silika çökeltimi, akışkan

pH'sının ayarlanması (asidik veya oldukça alkali ortam) ve akışkan sıcaklığının belli bir hat boyunca sabit kalmasının sağlanması ile etkili şekilde engellenebilmektedir (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016). Yukarıda sayılan nedenlerle kuyu içinde CaCO_3 çökelişi ağırlıklı olarak beklenirken, re-enjeksiyon hatlarında ve sıcaklık düşüm noktalarında silika mineralleri çökelişi söz konusudur.

BATI ANADOLU'DAKİ JEOTERMAL SİSTEMLERİN REZERVUAR JEOLJİSİ VE KABUKLAŞMA EĞİLİMLERİ

Rezervuar Jeolojisi

Batı Anadolu'da yer alan keşfedilmiş yüksek sıcaklıktaki jeotermal sistemler ağırlıklı olarak Ege Açılma Zonu'na ait Büyük Menderes Grabeni ve Gediz Grabeninin doğusunda yer almaktadırlar (Şekil 3). 1960'lı yıllardan itibaren jeotermal kaynaklar açısından incelenen Büyük Menderes Grabeninde yer alan Germencik, Salavatlı, Pamukören ve Kızıldere jeotermal sahalarının tamamında elektrik üretimine uygun sıcaklıkta akışkan bulunmaktadır.

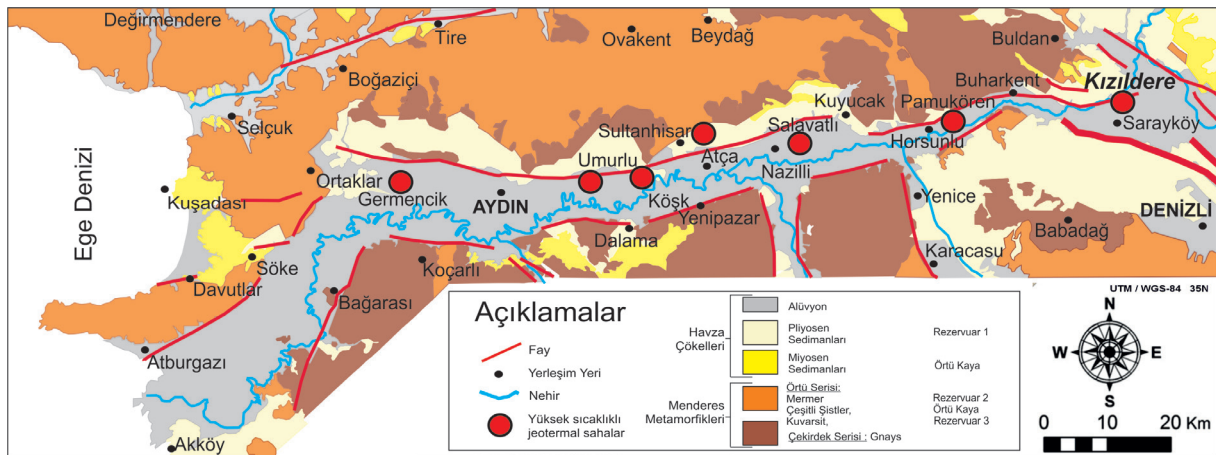
Bu çalışma kapsamında yer alan gerek Büyük Menderes Grabeni gerekse Gediz Grabeni temelinde bulunan Paleozoyik yaşlı Menderes masifine ait metamorfitletler genellikle tabandan tavana doğru çeşitli gnayslar, şistler, kuvarsitler, mikaşistler ve mermerlerle temsil edilmektedir (Domingo ve Samilgil, 1970; Filiz vd. 2000, Şimşek vd. 2005; Wiersberg vd. 2011). Jeolojik istifte genel olarak Paleozoyik birimler üzerine Havza çökelleri olarak da nitelendirilen Alt Pliyosen yaşlı konglomera, kumtaşı, kiltaşından oluşan Kızılburun Formasyonu, kireçtaşı, kiltaş ve marndan oluşan Sazak Formasyonu ve kumtaşı ve marndan oluşan Kolonkoya Formasyonu, Üst Pliyosen yaşlı çakiltaş, kiltaş, kumtaşı ve kireçtaşından oluşan Tosunlar Formasyonu gelmektedir. Bu birimler üzerinde Kuvaterner yaşlı alüvyon, yamaç molozu ve travertenler gelişmiştir.

Çalışma alanında; en sığ rezervuar Pliyosen yaşlı Sazak Formasyonuna ait kireçtaşları olup, ortalama 170 °C rezervuar sıcaklıklara karşılık gelmektedir (Şimşek, 1985). İkinci rezervuar daha derinde Paleozoyik yaşlı metamorfitletlerin üst zonlarında yer alan ve grabenin doğusunda daha ağırlıklı olarak gözlenen İğdecik Formasyonu (Şimşek, 2005) olarak da adlandırılan kuvarsit-şist ardalanması olup, ilk rezervuara göre daha geçirimli ve gözeneklilik göstererek, ortalama 200 °C akışkan sıcaklığına karşılık gelmektedir (Haizlip vd. 2013). Paleozoyik birimlerden İğdecik Formasyonuna ait kalın mikaşistlerin altında gözlenen gnays ve kuvarsitler özellikle Kızıldere jeotermal sahasında yapılan derin sondajlarla ortaya konulmuş olup bu en derin üçüncü rezervuardan 240 °C civarında sıcaklık ölçülmüştür (Şimşek vd. 2005).

Gediz Grabeni içindeki Alaşehir Jeotermal Alanında ise Paleozoyik yaşlı metamorfitletler üzerine Miyosen yaşlı Alaşehir ve Gediz Formasyonları gelmekte, bu birimlerin üzerinde ise Pliyosen yaşlı Kaletepe Formasyonu bulunmaktadır (Yazman vd. 1998). İstif Kuvaterner yaşlı sedimanlarla tamamlanmaktadır (Bozkurt vd. 2002). Yapılan jeotermal sondajlarla sığda yer alan Kaletepe Formasyonu birinci, Alaşehir Formasyonu ve özellikle Paleozoyik yaşlı mermer ise ikinci rezervuar olarak belirtilmiş, kireçtaşları ve mermerlerden 200 °C'lik akışkan sıcaklığı elde edilmiştir (Zorlu Jeotermal A.Ş. ÇED Raporu 2013; Tut vd. 2013).

Jeotermal Akışkandan Kaynaklanan Kabuklaşma Eğilimleri

Jeotermal sistemlerdeki kabuklaşma eğilimleri, rezervuar kayaları-jeotermal akışkan etkileşimiyle ilgili olsa da, yüzeye çıkan akışkanın kaynama noktasından itibaren gaz fazının buhar fazından ayrılması, yüzeyde sıcaklık ve basınç değişim noktalarında akışkan içindeki minerallerin duraylılık alanlarının değişimlerine de bağlıdır.



Şekil 3. Büyük Menderes Grabeni boyunca gözlenen jeotermal sahaların konumu (Haklıdır vd. 2012)

Figure 3. Geothermal fields in the Büyük Menderes Graben (Haklıdır et al. 2012)

Özellikle Batı Anadolu'da Büyük Menderes ve Gediz Grabeni Alaşehir bölgesinde rezervuar kayaların benzerlik sunması, mermerlerin rezervuar kaya olarak gözlenmesi, rezervuardan kaynaklanan yüksek CO₂ konsantrasyonlarına işaret etmektedir (Çizelge 1). Karbonat minerallerinin asidik jeotermal akışkan içinde çözünmesi, sedimanter kaynaklı yüksek CO₂ konsantrasyonuna olanak sağladığı düşünülmekte olup, magmatik kaynaklı olduğuna yönelik bir kanıt bulunamamıştır (Haizlip Robinson vd. 2013). Jeotermal rezervuarlardan kaynaklı CO₂ salınımının Kızıldere jeotermal sahasında 122 kg/kwh olduğu belirtilmektedir (Bertani ve Thain, 2002; EBRD Pluto, 2016). Yukarıda adı geçen tüm sahalarda yoğunlaşmayan gazların %95-98'i CO₂'den oluşmakta ve rezervuardaki kütlece oranları (Haizlip Robinson vd. 2013); Kızıldere sığ rezervuarda %1.5, derin rezervuarda %3; Germencik'te %2.5, Pamukören-Salavatlı'da %1.5 ve Alaşehir'de %1.78 olarak hesaplanmıştır (Yıldırım ve Yıldırım, 2015). Büyük Menderes ve Gediz Grabeni üzerindeki bu sahalardaki su tipleri ise; Kızıldere'de; Na-K-HCO₃-SO₄, Germencik'te; Na-(K)-Cl-HCO₃, Pamukören-Salavatlı'da; Na-

K-HCO₃-Cl ve Alaşehir'de Na-K-HCO₃-Cl olarak tespit edilmiştir (Yıldırım ve Yıldırım, 2015) (Çizelge 2). Yüksek CO₂ oranlarının kuyularda kaynama noktası itibariyle buhar fazından ayrılmaya çalışması ortam pH'sını değiştirmekte ve jeotermal sahalarda çok yaygın gözlenen CaCO₃ kabuklaşmasına neden olmaktadır. Yıldırım ve Yıldırım (2015) her iki grabendeki sahalarda engel olunmadığında 50 m. uzunluğundaki bir boruda 3-7 mm/gün CaCO₃ çökeltme olabileceğini belirtmektedirler. Jeotermal sahalarda gözlenen diğer bir kabuklaşma minerali de aragonit olup, bu tip karbonat minerallerinin akışkandaki doygunluk dereceleri her kuyuda farklı kaynama noktasına bağlı olarak değişmektedir (Tarcan, 2005). Batı Anadolu'da bu sahalarda gözlenen çökeltme eğiliminde olan mineraller ise SiO₂ ve Al-Mg silika mineralleri, sölestin ve stronsiyumlu minerallerden kaynaklı SrCO₃ ve stibnitter (Tarcan,2005; Haizlip Robinson vd. 2013; Osborn vd. 2010). Bu tip kabuklaşma oluşturan minerallerden silika kondüktif soğumaya bağlı olarak çökeltmektedir. Bu kabuklaşmaların Kızıldere ve Salavatlı'da 120 °C, Germencik'te ise 90 °C altında geliştiği belirtilmiştir (Tarcan, 2005).

Çizelge 1. Batı Anadolu’da yüksek sıcaklıktaki sistemlerden alınan jeotermal akışkanların gaz analizleri sonuçları (Haizlip Robinson vd. 2013)

Table 1. *gas analysis results of geothermal fluids from high temperature systems in Western Anatolia (Haizlip Robinson et al. 2013)*

Jeotermal Saha	Rezervuar gaz/buhar(kg/kg)	CO ₂ %	H ₂ S %	Ar %	N ₂ %	CH ₄ %	H ₂ %
Kızıldere Derin Rezervuar	0.030	98.7	0.021	0.01	0.67	0.56	0.025
Germencik	0.021	98.5	0.21	0.001	0.44	0.70	0.035
Alaşehir	0.034	98.5	0.20	0.004	0.40	0.80	0.07

Çizelge 2. Batı Anadolu’da yüksek sıcaklıktaki jeotermal sistemlerden alınan akışkanların kimyasal analiz sonuçları (Yıldırım ve Yıldırım 2015’ten alınmıştır)

Table 2. *Chemical analysis results of geothermal fluids from high temperature geothermal systems in Western Anatolia (after Yıldırım and Yıldırım, 2015)*

Parametreler	Kızıldere R1-A	Pamukören AP-1	Germencik OB-9	Alaşehir BY-1
Sıcaklık (°C)	230	191	205	196
pH	8.7	8.86	7.7	8.67
EC (µS/cm)	5550	4070	4969	2682
Na (mg/l)	1060	1225	1437	605
K (mg/l)	170	148	121	104
Ca (mg/l)	1.1	2.45	1.15	5.4
Mg (mg/l)	0.54	0.67	0.183	1.39
SiO ₂ (mg/l)	529	395	425	349
HCO ₃ (mg/l)	2035	2293	1427	1317
SO ₄ (mg/l)	582	220	21.2	13
Cl (mg/l)	100	297	1556	1317
B (mg/l)	22.6	33.5	58	96
Fe (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	0.06

KABUKLAŞMA ENGELLENMESİNDE VE KONTROLÜNDE KULLANILAN YÖNTEMLER: KIZILDERE-II JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ ÖRNEĞİ

Jeotermal kuyularda ve yüzey ekipmanlarında oluşan kabuklaşmaların temel nedeni, basınç düşmesiyle karbondioksit gazının ortamdan ayrılmasıdır. Bu nedenle jeotermal sahalardaki kuyularda ve yüzey ekipmanlarında basınç düşüm noktalarında özellikle CaCO₃ kabuklaşması ile karşılaşmak her zaman söz konusudur. Bununla birlikte jeotermal sahalarda silika ve sülfürlü bileşiklerden oluşan kabuklaşmalar da

gözlenebilmektedir. Bu kabuklaşma türlerini belirleyici etmen, bir mineralin akışkanın bulunduğu sıcaklık ve basınç koşullarındaki doygunluk oranıdır. Minerallerin doygunluk/çözünürlük oranları ise ortamın basınç ve sıcaklık değerleri dışında tuzluluk ve pH değerleri ile yakından ilişkilidir (Nicholson, 1993).

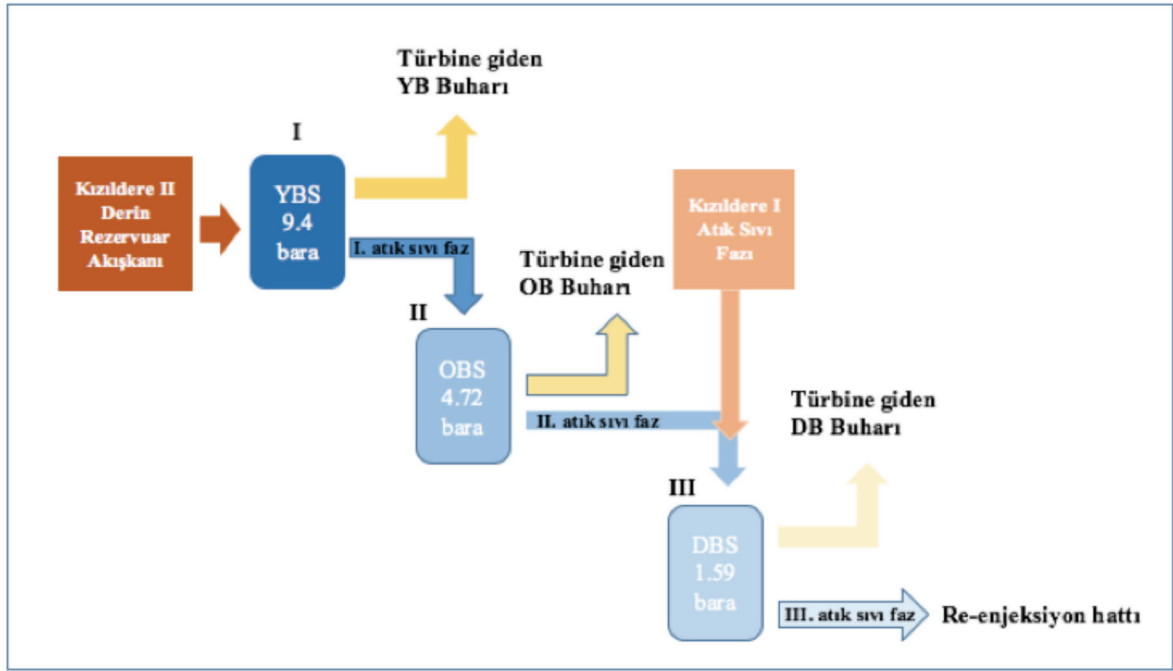
Jeotermal enerji santrallerinde ve ısı merkezlerinde özellikle basınç ve sıcaklık noktalarında oluşan kabuklaşmalar tıkanma yaratarak, üretimi azaltmakta ve mekanik tesisatın çalışmasını engellemektedir. Jeotermal sahalarda açılan kuyu ve yüzey ekipmanlarında

oluşan kabuklaşmaları azami oranda önlemek için kuyu içine kabuklaşma engelleyici inhibitör olarak nitelendirilen, fosfanat, polimer ya da bu ürünlerin karışımından üretilen çözücü kimyasallar uygulanmaktadır. Jeotermal üretim sahalarda inhibitör kullanılmaya başlanmadan önceki dönemlerde kuyularda mekanik temizlik yapılmakta ve üretim düştüğünde sistem durdurularak, kuyularda mekanik temizlik ve asitleme işlemleri yapıldığı bilinmektedir (Kındap vd. 2010). Özellikle yüksek sıcaklıktaki sahalarda, flaş ve çoklu flaşlı sistemlerde inhibitör uygulanmayan kuyularda termodinamik dönüşümler nedeniyle çok noktada gözlenen basınç ve sıcak düşümleri nedeniyle mineral çökelmeleri hızla gelişmekte olup, kuyuların üretim debilerini kısa zamanda düşürmekte, yüzey ekipmanlarının tıkanmalarına neden olmaktadır. Jeotermal kuyularda yüksek maliyetli olan belli periyotlarda yapılması gereken mekanik temizlik işleminden ziyade inhibitör kullanımı, üretim kaybını ve maliyetleri düşüren uygulamalar olduğundan, ülkemizde ve dünyada en çok tercih edilen uygulamadır. Mineral çökeltim koşullarını gözlemek amacıyla sistemde basıncın düştüğü noktalardan önce ve sonra metal kontrol gözlem kuponlarının kullanılması da yaygın olarak izleme yöntemidir.

Kızıldere-II Jeotermal Santrali Denizli ilinin Sarayköy ilçesinde, 1984 yılında kurulan ilk jeotermal santral olan Kızıldere-I Santrali ile aynı lisans alanında kurularak, 2013 yılı Ekim ayında devreye alınmış olan, üçlü flaş ve binary sistemlerinden oluşan 80 MWe gücünde bir santraldir. Dünyadaki 3. üçlü flaş sistemi teknolojisine sahip olan santral (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016), 60 MWe flaş türbin ve 2 adet 10 MWe gücünde binary ünitelerden oluşmakta ve 50 MWt ısıtmanın yapıldığı, Kızıldere-I Santrali'nden gelen sıcak atık akışkanının da kullanıldığı entegre bir sistemdir. Santralde jeotermal akışkan yüksek, orta, düşük basınç olmak üzere üç ayrı seperatör sisteminden geçerek kademeli

olarak buhar üretmekte olup, her seperatör sisteminden elde edilen buhar, flaş sistemine ait buhar türbinin yüksek, orta, düşük basınç kademesine iletilmektedir (Şekil 4). Kızıldere-I Santrali'nden gelen yaklaşık 140 °C sıcaklığında re-enjekte edilmeye hazır akışkan ise, Kızıldere-II Santrali'nin düşük basınç seperatörüne ayrı bir boru hattı iletilerek daha fazla buhar elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Sistemde son olarak düşük basınç seperatöründen çıkan atık sıvı, re-enjeksiyon pompaları yardımıyla re-enjeksiyon kuyularına gönderilmektedir. Santral 9 üretim ve 8 re-enjeksiyon kuyusu ile devreye alınmış olup, ortalama 220 °C rezervuar sıcaklığı ve 3600 t/sa akışkan ile enerji üretimine başlamıştır (Geologica, 2012; Haklıdır Tut vd. 2015). Sistemde binary ünitelere ısıtıcı akışkan Kızıldere-II yüksek basınç seperatöründen sağlanmaktadır.

Kızıldere-II Santrali için üretim yapan derin rezervuardan gelen akışkanın yüzey koşullarında kabuk oluşturma potansiyeline ilaveten üçlü flaş sisteminde yüksek basınç seperatörü ve re-enjeksiyon uygulaması arasında her seperasyon sisteminde, hem akışkanın bünyesindeki gazın hem de basıncın azalması akışkan içindeki minerallerin duraylılıklarının değişmesine neden olmaktadır (9.4 bardan 1.59 bara düşen basınç koşulları). Bu basınç değişimine paralel olarak, akışkan sıcaklığının sistemde re-enjeksiyon hattına kadar geçen süreçte düşmesi, sistemin farklı noktalarında kabuklaşmaya neden olacak koşulları sağlamaktadır (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016) (Şekil 4). Kızıldere-II Santrali için üretim yapan derin rezervuar kuyularından gelen akışkan düşük basınç seperatörüne kadar bünyesindeki buharını ve gazını kademeli olarak kaybetmekte, bu seperatör sisteminde ise Kızıldere-I Santrali'nden gelen daha sığ rezervuarı temsil eden kuyulardan gelen akışkanın atık kısmı bu akışkana karışmakta ve düşük basınç buharı türbine gönderildikten sonra kalan tüm akışkan re-enjeksiyon hattına gönderilmektedir.



Şekil 4. Kızıldere-II Jeotermal Santrali üçlü flaş sisteminde akışkan seperasyon sistemi (Geologica 2012'den düzenlenerek) (YBS: Yüksek Basınç Seperatorü, OBS: Orta Basınç Seperatorü, DBS: Düşük Basınç Seperatorü)

Figure 4. Fluid separationsystem in Kızıldere-II Geothermal Power Plant triple flash system (Modified after Geologica 2012) (YBS: High Pressure Seperator, OBS: Medium Pressure Seperator, DBS: Low Pressure Seperator)

Bu tip çoklu flaş sisteminin kullanıldığı sistemlerde basınç düşmesi öncesinde kabuklaşma engelleyici inhibitör kullanımı çökel oluşmasını kontrol altına alabilmek için en uygun yoldur. Bu amaçla sistemde oluşabilecek kabuklaşma tipleri, akışkan kimyası ve farklı sıcaklıklar gözetilerek WATCH, PhreeqC gibi su modelleme programlarıyla hesaplanarak, santral işletilmeye başlamadan önce büyük oranda tespit edilebilmektedir.

Kızıldere-II Jeotermal Santrali'nde üretim kuyularında ve yüzey hatlarında oluşabilecek bazı minerallerin farklı sıcaklık koşullarında

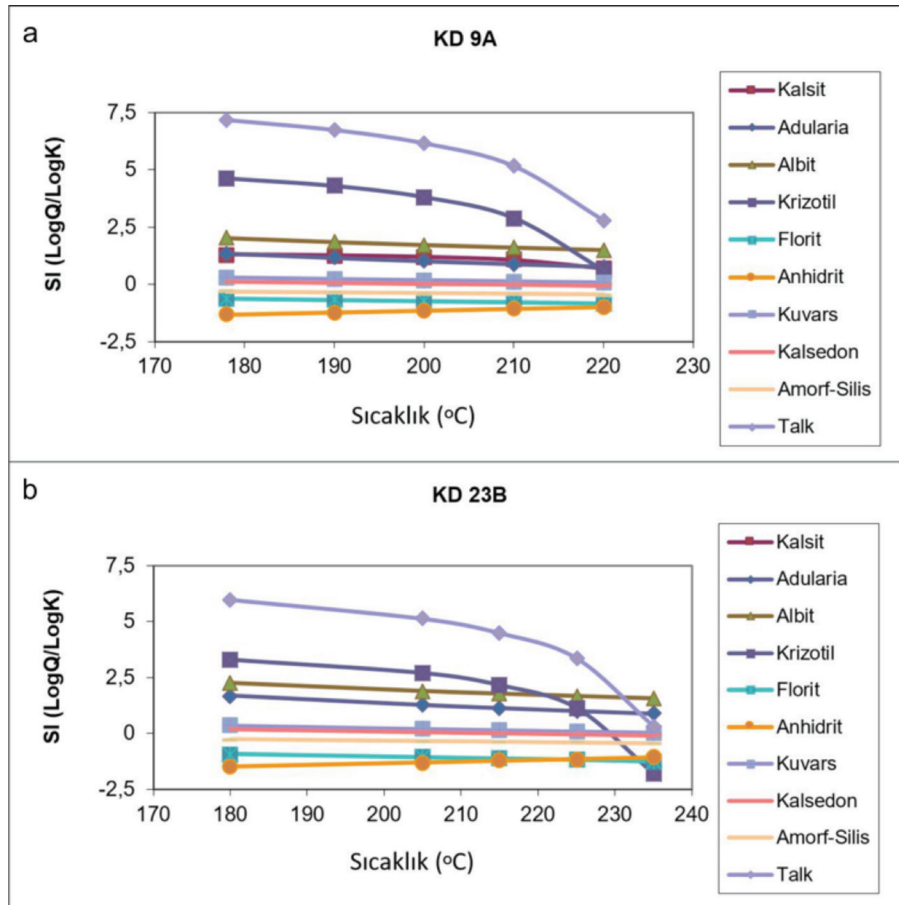
duraylılıklarına bağlı olarak derin rezervuarı temsil üretim kuyularından alınan akışkanın analiz sonuçlarına dayanarak (Çizelge 3) WATCH programı ile yapılan DI hesaplamalarında sistemde özellikle kalsit ve Al-silikatlı çökeltilerin beklenmektedir (Şekil 5a, 5b). Seperasyon sisteminde değişen P, T koşullarında bu çökelmelerin düşük basınç seperatörüne kadar devam edebileceği öngörülmektedir. Re-enjeksiyon akışkanı pH'sının 9.4'ün üzerinde olması, akışkan sıcaklığının 110 °C altına düşmemesi durumunda bu sahada yoğun bir silika çökmesinin beklenmediğini işaret etmektedir (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016).

Çizelge 3. Kızıldere Jeotermal Sahasında derin rezervuar kuyularını temsil eden KD-9A ve KD-23B akışkan analiz sonuçları (Analiz sonuçları Zorlu Doğal Elektrik Üretim A.Ş'den alınmıştır)

Table 3. Representative deep reservoir wells; KD-9A and KD-23B fluids analysis resultsin Kızıldere Geothermal Field (Analysis results was taken from Zorlu Doğal Elektrik Üretim Company)

Kuyu No	Örnekleme Noktası	KBB (bar)	EC	T (°C)	pH	Major Katyonlar (mg/l)										Major Anyonlar (mg/l)				
						K	Na	Ca	Mg	Li	Fe	Bt	SiO ₂	NH ₄ ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	
KD9A	Örnekleme Separatörü	13.90	4200	20.6	7.90	128.3	1116.9	5.74	0.09	2.78	<0.05	23.50	391	5.70	0	2406	91.21	602.09	28.28	
KD23B	Örnekleme Separatörü	11.60	4800	20.8	7.60	162.9	1274.6	5.86	0.03	4.25	<0.05	25.00	445	4.98	0	2834	111.22	701.06	23.80	

Kuyu No	İz Element (mg/l)						% Gaz Analizleri							
	As	PO4	Hg	Sr	Ba	Al	CO2	H2S	N2	CH4	Ar	O2	H2	He
KD9A	0.64	0.44	<0.005	0.81	0.06	1.20	99.28	0.0398	0.4201	0.2384	0.0034	0.0026	0.00279	0.000024
KD23B	1.19	0.44	<0.005	0.47	0.05	1.30	99.28	0.0404	0.3926	0.2760	0.0032	0.0029	0.00164	0.000030



Şekil 5. a. Kızıldere- II Jeotermal Santrali'ne ait derin rezervuarı temsil eden KD-9A kuyusuna ait DI hesabı, **b.** Kızıldere-II Jeotermal Santraline ait derin rezervuarı temsil eden KD-23B kuyusuna ait DI hesabı

Figure 5. a. SI calculation for KD-9A deep reservoir well in Kızıldere-II Geothermal Power Plant, **b.** SI calculation for KD-23B deep reservoir well in Kızıldere-II Geothermal Power Plant

Jeotermal Sahalarda Kabuklaşma Önleyici İnhibitör Çalışma Mekanizmaları ve Malzeme Seçiminin Önemi

Jeotermal sahalarda temelde rezervuar sıcaklığına bağlı olarak kabuklaşma engelleyici inhibitör seçimi yapılmaktadır. Seçilecek inhibitörün duraylılığını sıcaklık ve basınç altında yitirerek parçalanmaması ve etkisini ortam koşullarında koruyarak, olası kabuklaşmayı engellemesi beklenmektedir. Her jeotermal sistem kendine özgü dinamikleri olup, farklı fiziksel ve kimyasal akışkan özelliklerine sahip olduğundan, seçilecek olan inhibitörün belirlenmesinde, daha önce su modelleme programlarıyla sahada beklenen kabuklaşmayı engellemeye yönelik davranışta bulunması, inhibitörün kuyu içi ve yüzey ekipmanlarına iletilmesi sırasında kullanılan dozaj sistemleriyle uyumlu olup, korozyona neden olmaması gerekmektedir. Çok asidik olan inhibitör kimyasalları su ile seyreltilerek kullanılsa bile inhibitör sisteminde kullanılan malzemeler karbon çeliği ise, kısa sürede metalin erimesine neden olabilmektedir (Haklıdır Tut, 2012).

Hali hazırda jeotermal sahalarda fosfanik asit/fosfonat organik bazlı, fosfanik asitlerin Na ve K tuzları ile nötrleştirilerek elde edilen inhibitörler, polimer inhibitörler ve polimer+fosfanik bazlı karışımlardan oluşmaktadır (Haklıdır Tut ve Şengün, 2016).

Fosfanik asitler ve fosfonat bazlı inhibitörler bünyelerinde bir veya daha fazla C-PO (OH)₂ veya C-PO(OR)₂ (R: alkyl, aryl) grubunu içeren bileşiklerdir (Kılıççioğlu, 2009). Bu tip inhibitörler içerdikleri aktif madde miktarlarının yüksek olması nedeniyle kalsit çökeliminde oldukça başarılı olup, kalsit minerallerinin yapılarına geçerek, Ca²⁺ ve CO₃²⁻ iyonlarının etrafını sararak, ortamda sert kabuk oluşmasını engellemektedirler. Düşük dozajlarla kesin sonuç alınabilse de pH değerleri 2'nin altında olup, inhibitör dozaj pompası borularında ciddi hasarlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle sıcaklığı düşük,

dozaj noktası çok derin kuyularda SS 316 veya 316 L malzemeleriyle kullanılması uygun olsa da (Kılıççioğlu, 2009), daha yüksek sıcaklık ve daha derin dozajlama noktalarında sistemi korumak amacıyla fosfonik asitlerin Na-K bazlı alkaliler kullanılarak pH değerlerinin nötr koşullara getirilerek, biraz daha yüksek dozajla, daha uzun kullanılması ekipmanların ömrünü uzatacağından tercih edilmelidir. Fosfonat bazlı inhibitörler 200 °C'ye yaklaşan sıcaklıklara kadar duraylılıklarını koruyabilmektedir. İnhibitör optimum dozajlarının belirlenmesi de önemli olup, kuyuda bu doz aşıldığında, kuyu içinde inhibitör dozaj sistemi ekipmanları üzerinde beklenmedik çökelmeler gözlenmektedir (Haklıdır Tut, 2012).

Polimer inhibitörler ise yüksek rezervuar sıcaklıkları ve basınçlarda yapıları gereği stabilitelelerini koruyabilmektedir. Polimer bazlı inhibitörlerde kullanılan hammaddeler genellikle polymaleinat, polyakrilamidler olup (Kılıççioğlu, 2009), kabuklaşmayı engelleme etkinliklerinin aynı miktardaki dozajlarda fosfonat asitlere göre daha düşük olduğu saha testleri sırasında da gözlenmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklıktaki sahalarda polimer-fosfonat inhibitör karışımları kullanılması verimli sonuç alınmasını sağlamakta, bu sonuçlar Büyük Menderes Grabeni doğusundaki Kızıldere sahasında da iyi sonuçlar vermektedir (Haklıdır Tut ve Şengün 2016).

Rezervuar sıcaklıkları, jeotermal sisteminin tipi, su ve gaz kompozisyonları, sistem ekipmanlarının malzemeleri ve sahadaki kısa süreli inhibitör testleri o saha için uygun inhibitör veya inhibitörlerin belirlenmesi için oldukça önemlidir. Uygun inhibitörün belirlenmesinin ardından seyreltme faktörü, inhibitörün uygulanacağı dozaj noktalarının belirlenmesi, inhibitör uygulamasının kuyu içinde flaş noktasının 10-50 m altına dek ulaşmasının sağlanması da sistemde etkin bir inhibitör uygulaması için gerekli görülmektedir.

Yüksek sıcaklıktaki jeotermal sistemlerde etkin bir kabuklaşma kontrolü için; kuyu içinde

ana separatör öncesi çoklu separasyon olduğunda separatörler arasında inhibitör dozajı uygulanması sahada tecrübe ile gözlenmektedir (Haklıdır Tut, 2012). Bu amaçla kullanılan inhibitör sistemleri, üretim kuyu başlarına kurulan ve kuyu içine inhibitörün verilebilmesi sağlayan lubrikatör sistemi, inhibitörün tanktan kuyu içine transferini sağlayan kapiler borunun sarılı olduğu tambur, inhibitör çözeltisinin bulunduğu inhibitör tankı ve inhibitörün tanktan alınıp, kuyu içine veya sisteme gönderilmesini sağlayan pompa ve dozaj kontrolünü yapan sistemden oluşmaktadır (Şekil 6).

deniz suyu katkısı gibi etkilerden dolayı kalsit, silika ve sülfürlü çökeltilerin oluşması nedeniyle birden fazla inhibitör kullanımı gerekebilmektedir (Tuzla İkili Çevrim Tip Jeotermal Santrali, Tuzla, Çanakkale).

Özellikle çoklu flaş sistemlerinde jeotermal akışkan farklı P, T koşullarında farklı çökeltiler oluşmasına neden olmaktadır. Bu tip sistemlerde farklı basınçtaki buharın türbine ulaşmasını sağlayan yüksek, orta ve düşük basınç separatörleri olmakta (Yamada vd. 2015) ve buhar ve suyun her ayrımında akışkan içinde çökeltme

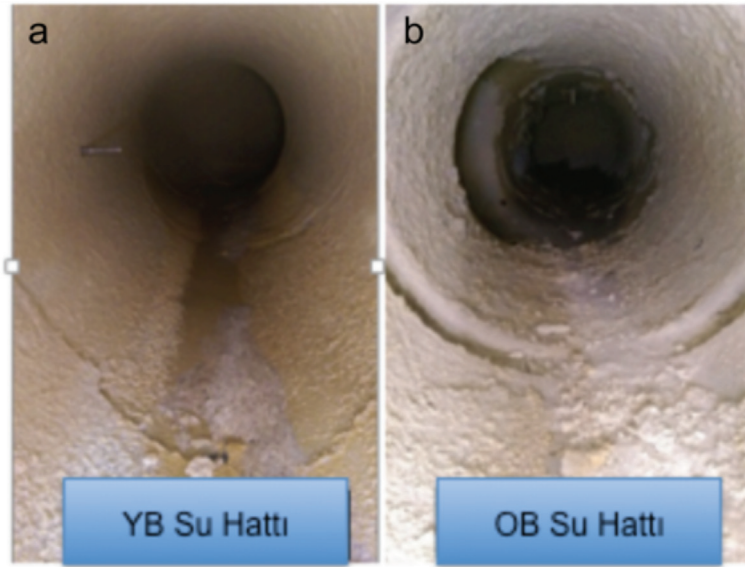


Şekil 6. Kızıldere-II Jeotermal Santralinde kabuklaşmayı engellemeye yönelik kurulan inhibitör sistemine örnek: 1: Lubrikatör Sistemi, 2. Makara Sistemi, 3. İnhibitör Tankı, 4. İnhibitör Pompa ve Kontrol Sistemi (Fotoğraf: Kızıldere-II Jeotermal Santrali)

Figure 6. A Sample for chemical inhibitor system in Kızıldere-II Geothermal Power Plant: 1:Lubricator System, 2. Drum 3. Inhibitor Tank, 4. Inhibitor Pump and Control System (Photo by: Kızıldere-II Geothermal Power Plant)

Enerji üretimi yapılan yüksek sıcaklıktaki sahalarda farklı teknolojiler kullanılmaktadır (çoklu flaş sistemler gibi). Büyük Menderes Grabeni'nde Germencik, Kızıldere ve Gediz Grabeni'nde ve Alaşehir'deki bu tip jeotermal güç santrallerinde tek bir inhibitör kullanımı veya tek noktadan inhibitör dozajı yapılması sistemin kabuklaşma kontrolünde etkin olamamaktadır. Kimi zaman kıyıya yakın jeotermal sahalarda

eğilimi artmakta, enjeksiyon hatlarında sıcaklığı düşen akışkanda silika çökeltimi gözlenmektedir (örneğin, Kızıldere-II Jeotermal Santrali). Polimer tip inhibitör kullanılmasından bir hafta sonra, santralin farklı noktalarından alınan çökel örneklerinde yüksek basınç separatörü ve enjeksiyon hattı arasında CaO, Al₂O₃, SiO₂, MgO mineral çökelimlerinin olduğu da gözlenmiştir (Şekil 7 a, b; Çizelge 4).



Şekil 7. a. Kızıldere-II Jeotermal Santrali yüksek basınç seperatörü su (brine) hattında gözlenen kabuklaşma (Fotoğraf: Kızıldere Jeotermal Santrali'nden alınmıştır), **b.** Kızıldere-II Jeotermal Santrali orta basınç seperatörü su (brine) hattında gözlenen kabuklaşma

Figure 7. a. Observed scaling in high pressure separator brine line at Kızıldere Geothermal Power Plant, **b.** Observed scaling in medium pressure separator brine line at Kızıldere Geothermal Power Plant (Photo is provided from Kızıldere Geothermal Power Plant)

Çizelge 4. Üçlü flaş tipteki Kızıldere-II Jeotermal Santrali'nde gözlenen kabuklaşma türleri (Haklıdır Tut ve Şengün 2016). (Örnekleme Noktası: OB: Orta Basınç Seperatörü, DB: Düşük Basınç Seperatörü, YB: Yüksek Basınç Seperatörü. 1-OB-DP Kontrol Vanası (KV) Öncesi, 2-YB-OB KV Sonrası, 4-YB-OB KV Öncesi, 5-OB-DB KV Öncesi, 6-OB-DB KV Hattı, 7-YB-OB KV Sonrası)

Table 4. Scaling types at Kızıldere-II the triple flash power plant (Haklıdır Tut and Şengün 2016). (Sampling Points: IP: Intermediate Pressure Seperator, LP: Low Pressure Seperator, HP: High Pressure Seperator. 1-Before IP-LP Control Valve (CV), 2- After HP-IP CV, 4-Before HP-IP CV, 5- Before IP-LP CV, 6- On CV IP-LP, 7- After HP-IP CV)

Gözlenen Çökeltme Örnekleme Noktası	Na ₂ O %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	SO ₃ %	K ₂ O %	CaO %
1	0.077	14.55	2.068	27.78	0.104	0.0591	0.3826	11.41
2	<0.014	6.012	1.182	12.46	0.7029	0.0328	0.1876	36.66
4	<0.014	18.83	2.413	37.54	0.4684	0.0754	0.3394	2
5	<0.014	10.79	1.626	21.65	0.2876	0.029	0.382	17.93
6	<0.014	18.45	2.57	36.87	0.0204	<0.0005	0.5908	1.805
7	<0.014	18.12	2.569	36.58	0.0202	<0.0005	0.6118	2.07

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Orta-yüksek sıcaklıktaki su baskın rezervuarlardan üretim yapan jeotermal santraller, kapasite faktörleri yüksek olması nedeniyle diğer yenilenebilir enerji sistemleri arasında önemli bir konumda bulunmakla birlikte sürdürülebilir olmaları için işletme koşulları oldukça dikkat gerektiren santrallerdir. Batı Anadolu'da Büyük Menderes ve Gediz Grabenleri boyunca kurulmuş olan santraller flaş, çoklu flaş, flaş ve ikili çevrim teknolojilerinin entegre şekilde kullanıldığı sistemlerdir.

Su baskın rezervuarlarda akışkanın derinden yüzeye doğru ilerlediği ve yüzey hatlarında buhar ve suyun birbirinden ayrılarak, buharın türbin hattına ve üretimden dönen sıcak su fazının re-enjeksiyon hatları boyunca ilerleyerek re-enjektörde edilmesi tüm yollar boyunca sıcaklık ve basınç koşullarının değişmesiyle, yüksek çözünmüş madde içeriğine sahip akışkanda mineral çökmesi gerçekleşmektedir. Jeotermal akışkanda çökecek minerallerin türü rezervuar jeolojisine bağlı olup, mineraller yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında su-kaya etkileşimine bağlı olarak sıvı fazda çözünmüş durumdadırlar. Batı Anadolu'da incelenen jeotermal sistemlerin rezervuar jeolojisi birbirleriyle büyük oranda benzerlik göstermektedir. Buna bağlı olarak, beklenen kabuklaşmalar ağırlıklı şekilde kalsit, sülfürlü mineraller ve silika tipindedir. Bu minerallerin akışkan fazda sistem tasarımına uygun olarak çözülmesi kalması, santrallerin üretim performanslarını arttırmakta ve bu nedenle, her enerji santralinde kullanılan teknolojiye göre ayrı bir kabuklaşmanın (mineral çökmesinin) hem kuyu içlerinde hem de yüzey ekipmanlarında engellenmesi ve bu amaçla inhibitör sistemleri kullanılması gerekmektedir. İnhibitörlerin seçimi yine akışkan kimyasına, rezervuar sıcaklığına göre yapılmalıdır. İnhibitör çözeltilerinin uygulanması sırasında basınç ve sıcaklık düşüm noktalarının bulunması ve uygulanacak dozajların optimum düzeylerinin sahada kısa dönem testleriyle

belirlenmelidir. Uygulanması gereken bu optimum inhibitör düzeylerinin altında kalınmaması veya üstüne çıkılmamasıyla, hem akışkandan hem de inhibitör kimyasından kaynaklı yeni kabuklaşma türlerinin oluşmamasına dikkat edilmesi ile enerji santrallerinin ömürlerinin uzaması ve sürdürülebilirliği sağlanabilmektedir. Özellikle flaş ve çoklu flaş tip santrallerde akışkanın çift faza ayrıldığı yüksek basınç, orta basınç ve düşük basınç seperasyon alanlarında, basınç ve sıcaklık düşümleri hızla geliştiğinden, üretim kuyuları dışında her seperasyon sistemi sonrasında da özellikle CaCO_3 çökelinin engellenmesi amacıyla inhibitör uygulanması sistemin korunması için oldukça kritik bir uygulamadır. Sistemde silikatlı minerallerin çökmesinin kontrolü amacıyla sistemdeki akışkanın re-enjeksiyon hattına ilerlerken sıcaklığının ve pH'sının kontrol edilmesi sistemin sürdürülebilirliği bakımından önem taşımaktadır.

KATKI BELİRTME

Yazar, Zorlu Enerji Genel Müdürü Sayın Ali Kındap'a veri paylaşımı ve bu alanda jeokimyasal çalışmalara verdikleri destekleri için, geçmişte Kızıldere Jeotermal Sahası'nda jeokimyasal süreçlerde birlikte çalıştığı Zorlu Doğal Elektrik Üretim A.Ş.'de halen Kıdemli Jeokimya Uzmanı olarak çalışan Sayın Raziye Şengün'e çalışmaya desteklerinden dolayı teşekkür eder.

EXTENDED SUMMARY

Geothermal power generation has been generally provided by moderate-high temperatures at deep geothermal zones in water-dominated reservoirs. For these systems, controlling of thermodynamically changes of liquid phase and monitoring of temperature and pressure effects on geothermal fluids have great importance to provide of geothermal system sustainability.

The geothermal power plant types have been recorded as binary, single-flash, multi-flash systems and bottoming cycle (flash + binary) along Büyük Menderes Graben and Gediz Graben in Western Anatolia. In Turkey, there are 33 installed geothermal power plants and total capacity is declared as 856 MWe by EMRA. All these power plants have been produced steam from water-dominated reservoirs in Western Anatolia. In these systems, more than a few fields' reservoir temperatures are recorded more than 200 °C and it is concluded that water-steam phases separates more than one time. It means pressure and temperature dramatically drops and mineral precipitation, which is calling scaling, starts after each separation system when geothermal fluids reach to surface at these systems.

Principally, after discharging of geothermal fluid, it directly goes to separator systems in high temperature water-dominated systems. These systems consist of different separator systems, which indicate different pressure values (such as high pressure, low pressure separators) at multi-flash systems. The flow rate is controlled by valves, while P, T parameters have been changed at different processes such as production, separation, reinjection. Changing of pressure and temperature values is also changed mineral-equilibrium in the fluid and some minerals tend to precipitate of the different points of a geothermal system. To control mineral precipitation chemical inhibitors have been used at different part of a geothermal system.

In Western Anatolia, Germencik (Aydın city), Kızıldere (Denizli city), Pamukören and Salavatlı (Aydın city), Alaşehir (Manisa city) fields are great geothermal energy potential to produce energy. Although these fields have so many installed geothermal power plants, because of water-dominated reservoirs and reservoir rocks, there are a few scaling minerals are declared such as calcite, stibnite and silica minerals in

these systems. It means that management of these power plants require high attention to protect performance of these systems.

Calcite, silica and some sulfide minerals are observed main scale types in a geothermal system. Calcite precipitation can be seen in production wells and surface equipment, while silica can be often observed at reinjection lines and other surface equipment also. In water-dominated systems, gas breakout or two-phase conditions occurs at the depth of borehole. Under dynamic conditions at depth, when measured total pressure lower than $P_{gas} + P_{liquid}$, flashing process starts. Calcite and silica stabilities are incompatible under same conditions in a geothermal system.

To prevent mineral precipitation in a production well, the chemical inhibitor must be injected into the flowing well through capillary tubing at 10-50 m below the estimated gas-breakout depth. Sometimes one dosage point may be not enough to prevent scale to protect of surface equipment before separator systems. With this reason, after wellhead, before the valve the second dosage point set to the system at high temperature systems. At a multi-flash system, chemical dosage systems must be installed before high pressure drop points to protect the mechanical equipment also. To observe mineral precipitation conditions, control coupons can be set before and after critical pressure drop points at the multi-flash system. Almost all scale prevention inhibitors can be categorized as phosphate, phosphate salts and polymeric forms. But field experiences have been observed that polymer-based inhibitors are relatively more stable compared to phosphate salts at high temperatures. In Western Anatolia, all geothermal power systems have been used inhibitor systems and different type inhibitors to provide efficiency and sustainability of their systems.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Bertani, R. ve Thain, I., 2002. Geothermal power generating plant CO₂ emission survey. IGA News 49, 1-3.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica Acta* 14: 3-30.
- Dewey, J.F.ve Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of American Bulletin*, 90, 8
- DiPippo, R., 2016. *Geothermal Power Plants : Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. 4th Edition. Waltham, MA : Butterworth-Heinemann.
- Dogliani, C., Agostini, S., Crespi, M., Innocenti F., Manetti P., Riguzzi, F. & Savaşçın M.Y., 2002. On the extension in western Anatolia and the Aegean Sea. *Virtual Explorer* 8, 169-183.
- Dramis, F., Materazzi, M. ve Cilla, G., 1999. Influence of Climatic Changes on Freshwater Travertine Deposition: A New Hypothesis. *Phys. Chem. Earth (A)*, Vol. 24. No: 10, pp. 893-897.
- EBRD Pluto, 2016. Assessing the use of CO₂ from Natural Sources for Commercial Purposes in Turkey-Pluto. Technical Report Pluto Programme.
- EPDK Raporu, 2017. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu 2017 Ocak Ayı Elektrik Piyasası Sektör Raporu, 60 sayfa.
- EPDK, 2017. www.epdk.gov.tr/lisanslar, 7 Nisan 2017
- Ellis, G.P., 1959. The Maillard Reaction. En: *Advances in Carbohydrate Chemistry*, Vol. XIV, Academic Press, New York, s 63-134.
- Filiz, S., Tarcan, G. ve Gemici, U., 2000. Geochemistry of the Germencik Geothermal Fields, Turkey. *Geothermal Resources Council Transactions*, V. 24.
- GEA, 2016. 2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report.
- Geologica, 2012. Zorlu Energy Kızıldere-II Geothermal Power Plant Design Criteria Report (yayınlanmamış).
- Haizlip Robinson, J., Stover, M., Garg, K.S., Haklıdır Tut, F.S. ve Prina, N., 2016. Origin and Impacts of High Concentrations of Carbon Dioxide in Geothermal Fluids of Western Turkey. *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 22-24.*
- Haizlip Robinson, J., Haklıdır Tut, F. ve Garg, S.K., 2013. Comparison of Reservoir Conditions in High Noncondensable Gas Geothermal Systems. 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford- CA, February 11-13, 2013.
- Haklıdır, Tut F.S. ve Şengün, R., 2016. Thermodynamic Effects on Scale Inhibitors Performance At Multi-flash and Advanced Geothermal Power Systems. *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, 22-24 February 2016.*
- Haklıdır Tut, F.S., Şengün, R. ve Haizlip Robinson, J., 2015. The Geochemistry of Deep Reservoir Wells in Kızıldere Geothermal Field (Turkey), *Proceedings of World Geothermal Congress, Melbourne-Australia, 19-24 April 2015.*
- Haklıdır Tut, F.S., 2012. Jeotermal Akışkan Kaynaklı Kabuklaşma Oluşumu ve Engellenmesinde Kontrol Parametrelerinin İzlenmesinin Önemi. *Türkiye Jeotermal Kaynaklar Arama ve Uygulama Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 08-09 Aralık 2012.*
- Haklıdır Tut, F.S., Uzun, A. ve Şengün, R., 2012. Investigation of reservoir characteristics of high enthalpy geothermal fields on Büyük Menderes Graben and sulphate variations of geothermal fluids in the graben. *Proceedings of International Earth Science Colloquium on the Aegean Region (IESCA), 1-5 October 2012, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.*
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun tektonik birlikleri. *MTA Dergisi*, 66, 20-34.
- Haklıdır Tut, F.S., 2007. Bursa İli ve Çevresindeki Termal, Maden ve Yeraltı Sularının Jeokimyasal İncelenmesi. *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 282 S.
- Kılıççıoğlu, F., 2009. Jeotermal Kuyularda Kalsit ve Silika Çökelmelerine Karşı Kullanılacak İnhibitör Çeşitleri ve Çalışma Mekanizmalarının İncelenmesi. *Bildiriler Kitabı, İzmir, 27-28 Nisan 2009.*
- Kındap, A., Kaya, T., Tut Haklıdır, F.S. ve Alpagut Bükülmez, A., 2010. Privatization of Kızıldere Geothermal Power Plant and New Approaches for Field and Plant. *World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 24-30 April 2010.*
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş. ve Başarır, N., 2015. Geothermal Country Update Report of Turkey (2010-

- 2015). Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Mutlu, H. ve Güleç, N., 1998. Hydrogeochemical outline of thermal waters and geothermometry applications in Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 85, 495-515.
- Mutlu, H., 2009. Jeotermal Akışkanlarda Su-Kayaç Etkileşimi. *Bildiriler Kitabı*, İzmir, 27-28 Nisan 2009.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin: Springer-Verlag.
- Osborn, W.L., Demirci, N., Güngör, A., Erkan, B. ve Yıldırım, Y., 2007. Carbonate Scale Inhibition in a High-Gas Geothermal Well, Germencik-Turkey. *Geothermal Resources Council Transactions*, V. 31, 2007.
- Şengör, A.M.C., 1982. Ege'nin neotektonik evrimini yöneten etkenler. O. Erol ve V. Oygür (editörler), *Batı Anadolu'nun Genç Tektoniği ve Volkanizması Paneli*, Türk. Jeol. Kur., Ankara, S. 59-71.
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş., Başarır, N., 2015. Geothermal country update of Turkey (2010-2015). *World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, April 19-24.
- Şimşek, Ş., 1985. Geothermal model of Denizli, Sarayköy-Buldan area. *Geothermics*, 14 (2/3), 393-417.
- Şimşek, Ş., Yıldırım, N. ve Gülgör, A., 2005. Developmental and environmental effects of the Kızıldere geothermal power project, Turkey. *Geothermics* 34, 239-256.
- Schoeller, H., 1962. *Les Eaux Souterraines*, Mason and C. Paris, 642 pp.
- Tarcan, G., Balaban Ozen, T., Gemici, U., Çolak, M. ve Karamanderesi, İ.H., 2016. Geochemical assessment of mineral scaling in Kızıldere geothermal field, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 75(19):1317
- Tarcan, G., 2005. Mineral saturation and scaling tendencies of waters discharged from wells (>150 °C) in geothermal areas of Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 142, p. 263-283.
- T.C. 10. Kalkınma Planı, 2013. T.C. Kalkınma Bakanlığı 2014-2018 10. Kalkınma Planı. www.onuncuplan.gov.tr, erişim tarihi 7 Nisan 2017.
- Tezcan A. K., 1979. Geothermal studies, their present status and contribution to heat flow contouring in Turkey. In: *Terrestrial heat flow in Europe*. Berlin: Springer-Verlag.
- Tut, F.S., 2003. Dünya Doğal ve Kültürel Mirası Pamukkale'nin Beyazlığının Korunması: Hidrojeokimyasal Bir Yaklaşımla. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 162 s.
- Yamada, S., Tamaya, Y. ve Muto, T., 2015. Unique Steam Turbine for Kızıldere Geothermal Power Plant in Turkey. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*.
- Yazman, M.K., Güven, A., Ermiş, Y., Yılmaz, M., Özdemir, I, Akçay, Y., Gönülalan, U., Tekeli, Ö., Aydemir, V., Sayılı, A., Batı, Z., İztan, H., Korucu, Ö. ve Grunnaleite, İ., 1998. Alasehir grabeni ve Alasehir - 1 prospekti nin değerlendirme raporu. TPAO Rapor No. 3864, 146 s (yayınlanmamış).
- Yıldırım, N. ve Yıldırım, A., 2015. High Total Inorganic Carbon Concentration, Dependent Carbonate Scaling and Mitigation System, in Moderate to High Enthalpy Geothermal Fields in Turkey. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne Australia, 25-29 April 2015*.
- Wiersberg, T., Süer, S., Güleç, N., Erzinger, J. ve Parlaktuna, M., 2011. Noble gas isotopes and the chemical composition of geothermal gases from the eastern part of the Büyük Menderes Graben (Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 208, 112-121.
- Zorlu Jeotermal A.Ş. ÇED Raporu, 2013. 45 MWe Alaşehir Jeotermal Santral Projesi Çevre Etki Değerlendirme Raporu.