

Bu makale aşağıda atfı bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.
Atfı bilgisi: Doğdu, N., Çelmen, O. 2023. Importance of reinjection in sustainability of geothermal resources and reinjection well location. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 171, 159-175. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1316785>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Jeotermal kaynakların sürdürülebilirliğinde reenjeksiyonun önemi ve Türkiye'de reenjeksiyon lokasyonları

Importance of reinjection in sustainability of geothermal resources and reinjection well locations in Türkiye

Nilgün DOĞDU^{a*}  ve Oktay ÇELMEN^a 

^a MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, 06530, Ankara, Türkiye.

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:
Reenjeksiyon,
Jeotermal Kaynaklar,
Sürdürülebilirlik,
Reenjeksiyon Lokasyonu

ÖZ

Jeotermal enerjinin sürdürülebilirliği, jeotermal kaynakların türü (doğal kaynaklar, kuyu), kullanım durumları (termal kullanım, konut-sera ısıtma, enerji vb.), kullanım miktarı (optimum debi, uygun basınç-sıcaklık değişimleri) ve yine bu kaynakların çeşitli etkilerden korunması ile ilgilidir. Jeotermal kaynağın reenjeksiyonu ise, sürdürülebilirlik kavramında en önemli hususlardan biridir. Jeotermal sahalarda kullanımdan dönen akışkanın rezervuara geri basımı için, rezervuardaki sıcaklık ve basınç koşullarındaki olumsuz değişmeleri önleyici tedbirlerin alınması önemlidir. Reenjeksiyon, jeotermal kaynakların korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için uygun koşullarda yapılmalıdır. Jeotermal kaynakların işletilmesinde reenjeksiyon/deşarj şartları ve yükümlülükleri 5686 Sayılı Kanun ve Yönetmelik hükümlerinde de belirtilmiştir. Jeotermal sahalarda arama faaliyetleri kapsamında çeşitli çalışmalar, üretim-reenjeksiyon alanlarının belirlenmesi ve reenjeksiyon kuyularının üretim kuyularındaki basınç-sıcaklık koşullarını olumsuz etkilemeyecek koşullarda belirlenmesi, jeotermal rezervuarın sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Geliş Tarihi: 17.10.2022
Kabul Tarihi: 19.06.2023

Keywords:
Reinjection, Geothermal
Resource, Sustainability,
Reinjection Location

ABSTRACT

Sustainability of geothermal energy is related with the type of geothermal resources (natural springs, well), usage situations (thermal, residential-greenhouse heating, energy, etc.), amount of use (optimal flow, appropriate pressure-temperature changes), conservation of resources, and is mostly achieved by reinjection of the geothermal fluid returning from usage. It is important to take measures to prevent adverse changes in temperature and pressure conditions in the reservoir to properly remove the fluid returning from use in geothermal areas from the environment and recharge the reservoir. Reinjection should be carried out under appropriate conditions for the protection of resources. In the operation of geothermal resources, reinjection/discharge conditions and obligations are also specified in the provisions of the Law No. 5686 and the implementing regulation. Various studies within the scope of exploration activities in geothermal fields, determining the production-reinjection areas and determination the location of the reinjection wells in conditions that will not adversely affect the production pressure-temperature conditions are of great importance for the sustainability of the geothermal reservoir.

*Başvurulacak yazar: Nilgün DOĞDU, nilgun.dogdu@mta.gov.tr

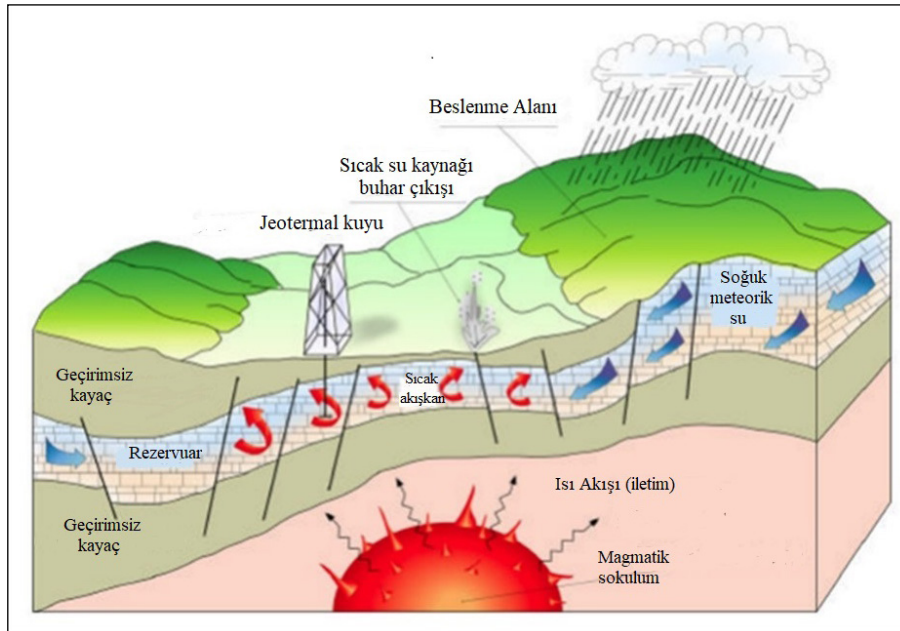
1. Giriş

İdeal jeotermal sistemler, (1) ekonomik derinlikte bir jeotermal sistem oluşturabilecek boyut ve jeolojik yaştaki ısı kaynağına, (2) sıcak su kaynaklarına hidrolik akışı sağlayacak fay ve kırıklara (3) ısınan akışkanın rezervuarda tutan ve ısınıp koruyan geçirimsiz örtü kayaya ve (4) jeotermal rezervuarı doğal olarak besleyen uygun bir besleme alanına sahip olmalıdır (Şekil 1).

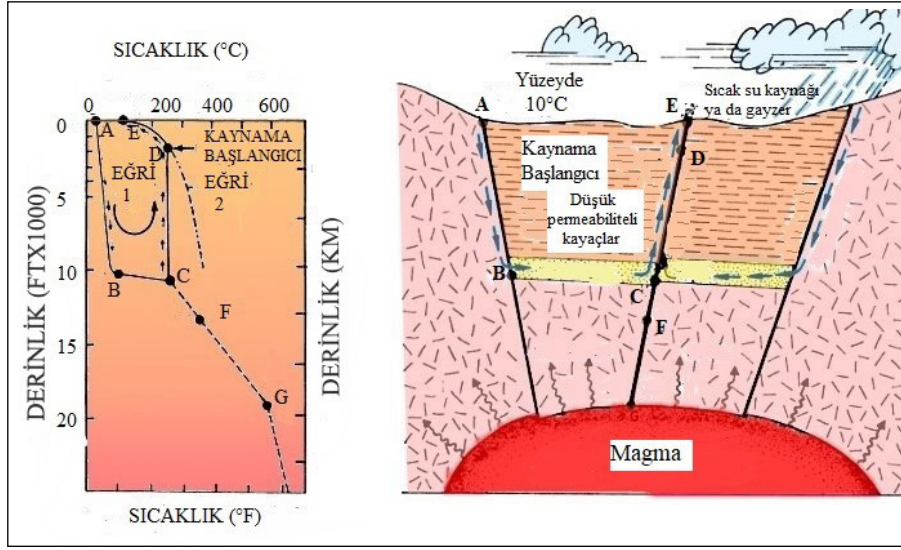
Bir jeotermal sistemdeki ısı kaynağı, yer kabuğundan kaynaklanan ısıdır ve bu ısı ya kondüktif (ısı radyasyonu) ya da konvektif (su ile taşınan maddenin hareketi ile) olarak taşınabilir. Yerkabuğunun hareketleri ve üst mantodaki magma farklılaşmasının neden olduğu katı kabuğun (litosfer) tektonik hatlar boyunca kırılması sonucu, yerkabuğunun derinliklerindeki ısı, sığ derinliklerde magmatik sokulumlar ve volkanik faaliyetler olarak ulaşabilmektedir. Bu kıvrımlanma ve kırıkların oluşturduğu litolojik birimler rezervuar zonları oluşturmaktadır. Bu sistemlerde su, yeryüzüne faylar ve çatlaklar yoluyla ilerler, burada magmatik sokulumlar ile ısınır ve yine kendisine hidrolik akışı sağlayacak faylar ve kırıklar yoluyla, alçalan soğuk su ile yükselen sıcak su arasındaki basınç kuvveti ile de

yükselir. Ancak jeotermal sistemlerde çoğu zaman ısı taşınımı magma ile temas halindeki su sirkülasyonu ile değil, manto ve kabuktan yeryüzüne ısı transferi ile de olabilmektedir. Meteorik sular, yerdeki kırık ve çatlaklardan derinlere sızarak yukarıda belirtilen ısı anomalisi bölgelerinde ısındıktan sonra tekrar yüzeye çıkarak ısınan sıvı, gözenekli, geçirgen litolojik birimlerde ve/veya zonlarda ekonomik olarak sığ derinliklerde depolanabilir. Jeotermal rezervuarın sürekli yenilenebilmesi için ise sıcak akışkanın, yeterince uzun mesafede yeniden ısınarak rezervuarı beslemesi gerekir. Jeotermal rezervuarın enerjisini kaybetmeden korunabilmesi için de, sıcaklık ve akışkan kaybını önleyecek geçirimsiz bir örtü kayası olması gerekir (Şekil 2).

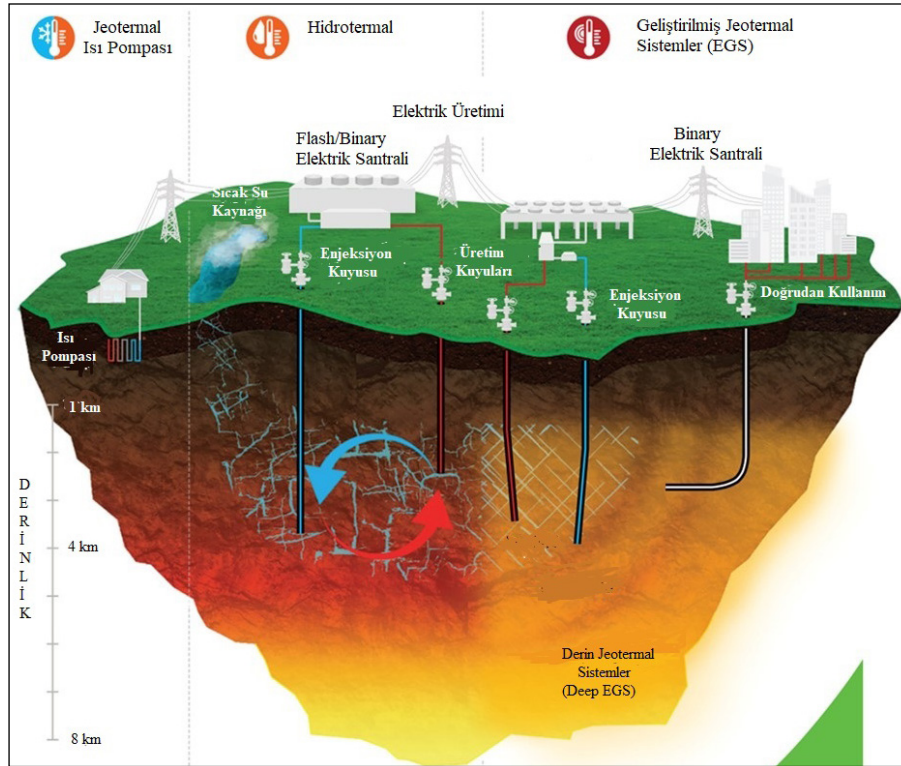
Jeotermal sistemlerde sürdürülebilirlik kavramı, jeotermal rezervuardan elde edilen akışkanın sıcaklık, basınç ve hidrokimyasal yapısı gibi fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilenmeden kullanılması ve ayrıca da jeotermal kaynağın kirletici etkilerinden korunmasını kapsamaktadır. Sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için jeotermal akışkanların optimum debide üretilmesi ve üretim-reenjeksiyon dengesinin sağlanması için uygun şekilde reenjekte edilmesi gerekmektedir (Şekil 3).



Şekil 1- Bir jeotermal sistemin şematik gösterimi (Barbier, 2002).



Şekil 2- Değişen sıcaklıklardaki bir jeotermal sistemin kavramsal modeli (White, 1973).



Şekil 3- Farklı jeotermal sistemlerde farklı işletme koşulları (Roberts, 2020).

2. Jeotermal Kaynaklarda Reenjeksiyon

İlk reenjeksiyon uygulamaları, The Geysers, ABD (1969), Otake, Japonya (1972), Larderello, İtalya (1974), Hatchobaru, Japonya (1977), Kakkonda, Japonya (1980) ve Onuma, Japonya (1981) gibi

yüksek sıcaklıkta elektrik üreten alanlarda başlamıştır. Reenjeksiyon kavramı öncelikle, jeotermal kullanımdan kaynaklanan atık suyu-dönüş suyunu bertaraf etmek için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise reenjeksiyon, reenjeksiyon sürecinin izlenmesi ve jeotermal akışkanın rezervuar ile çevre üzerindeki

etkisinin görülmesi nedeniyle, her bir jeotermal alana özgü reenjeksiyon stratejisinin belirlenmesi şeklinde bir bilim haline gelmiştir (Kamila vd., 2021). Jeotermal akışkanın reenjeksiyonu, enerjisi azalmış sıcak akışkanın bertarafı ve aynı zamanda rezervuarın etkili bir geri beslenmesini sağlar (Axelsson, 2013). Jeotermal suyun kullanıldığı ısıtma ve enerji üretiminde, kullanımdan dönen suyun reenjeksiyonu, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarını dengede tutmak, debi düşüşünü önlemek için gereklidir.

Sıvı fazın hakim olduğu jeotermal rezervuarlarda su sıcaklığı buharlaşma sıcaklığından daha düşük olup termal akışkan su fazında kalmaktadır. Sistemin korunması ve faz geçişi açısından akışkan miktarındaki azalmanın rezervuar basıncını olumsuz etkileme riski olduğu ve bu durumda reenjeksiyonun olumlu etki yapacağı düşünülmelidir. Bununla birlikte, sıcak akışkanın elektrik üretimi için kullanıldığı yüksek entalpili bir jeotermal rezervuarda, rezervuar basıncındaki düşüş, rezervuar sıcaklığının buharlaşma sıcaklığından daha yüksek olmasına neden olabilir ve bu da daha fazla buhar üretimine yol açar.

İki fazlı jeotermal rezervuarlarda, sıvı haldeki su ve buharın birleşimi vardır. Yüksek geçirgenlik ve çatlaklardan kaynaklanan ikincil gözeneklilik, bu tür rezervuarlar için önemli rezervuar özellikleridir. Bu tür rezervuarlarda basınç düşüşü riski rezervuarı çok hızlı etkileyebilir. Bu tür sistemlerde üretim-reenjeksiyon dengesi korunduğu sürece sadece kısa süreli basınç ve sıcaklık değişimleri gözlenebilir. Hem 150°C'nin altındaki göreceli olarak daha düşük entalpili alanlarda hem de 150°C'nin üzerindeki yüksek entalpili alanlarda, reenjeksiyon politikası kullanım amacına göre değişir. Buhar fazının baskın olduğu jeotermal rezervuarlarda akışkan sıcaklığı buhar basıncından yüksek olup, buhar fazı hakimdir. Bu rezervuarlarda, reenjeksiyon işlemi ile rezervuar sisteminin sürekli geri beslenmesi önemlidir.

Jeotermal sahalarda reenjeksiyon çalışmaları yapılmasının gerekliliği aşağıda sıralanmıştır;

- Sürekli üretim ve yetersiz beslenme nedeniyle basınç düşüşündeki azalma,
- Çevre kirliliğini önlemek,
- Kullanımdan sonra jeotermal enerjinin geri kazanılması,

- Jeotermal alanın sürdürülebilirliğini sağlamak için rezervuardaki enerjinin devamlığını sağlamak
- Yüzeyde çökme ve herhangi bir yüzey hareketini önleme.

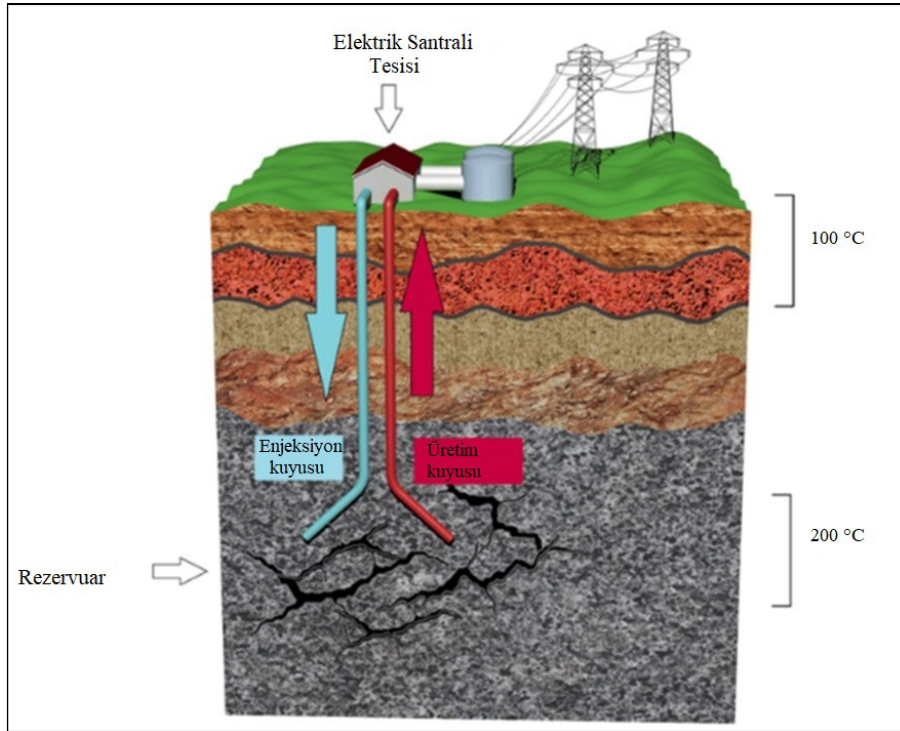
Dolayısıyla reenjeksiyon, rezervuarın basınç sürdürülebilirliğini sağlar, zemin çökme riskini azaltır ve rezervuarın termal aktivitesini sürdürmek için önemlidir (Şekil 4).

Üretimle oluşan kütle ve enerji kaybı geri kazanılarak rezervuardan alınan enerji miktarı artırılabilir. Rezervuar basıncının düşmesi nedeniyle jeotermal kuyularda üretim de düşebilir. Sıvı baskın faz, rezervuar basıncını kontrol ettiğinden, sıvı faz miktarının korunması rezervuar basıncını da koruyacaktır.

Türkiye'de halen işletmede olan jeotermal enerji santrallerinde, kullanılan jeotermal akışkanın %90-100 oranında reenjeksiyonu, vazgeçilmez rezervuar yönetimi faaliyetlerinden biridir. Alan ısıtmada (konut veya sera), kullanılan jeotermal akışkanın ise yaklaşık %70'i reenjekte edilmekte olup, bazı durumlarda doğrudan ısıtma için kullanılan jeotermal akışkan, termal tesisler ve diğer entegre amaçlar için de kullanılabilir.

Jeotermal sahalarda reenjeksiyon işlemi düzgün yapılmadığı takdirde rezervuar basıncı düşebilir ve su seviyesinin düşmesi nedeniyle sahada çökmeler meydana gelebilir. Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynakları olarak sınıflandırılan jeotermal kaynaklar, reenjeksiyonun yapılamaması nedeniyle yenilenemeyip kısa sürede tükenir. Ayrıca, reenjeksiyon uygun koşullarda yapılmadığı takdirde, rezervuar veya sistemde soğuma ile kabuklaşma, korozyon oluşabileceği gibi, uygun şartlarda yapılmayan reenjeksiyon işlemi yüzey sularını da olumsuz etkileyebilir.

Diğer kuyulara olan mesafe (üretim/reenjeksiyon), reenjekte edilen akışkan miktarı, sıcaklık, kimyasal özellikler, jeotermal akışkanın kısa ve uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi ile reenjeksiyon işlemi, sürdürülebilir işletmede önemli rol oynar, jeotermal rezervuarın geliştirilmesini de sağlar. Farklı jeotermal alanlarda farklı reenjeksiyon stratejilerinin kullanılması, jeotermal alanın tüm teknik özelliklerinin incelenmesini ve bilinmesini gerektirir.



Şekil 4- Derin bir jeotermal sistemde yer alan üretim ve reenjeksiyon kuyuları (Vitaller vd., 2019).

Bu amaçla, jeotermal rezervuar sistemleri, rezervardaki aktif akışkan (buhar veya sıvı fazı baskın) durumuna göre farklı amaçlar için sınıflandırılarak, sistemin kimyasal bileşimine göre bir rezervuar modeli oluşturulmaktadır.

Fay kontrollü bir jeotermal sistemde ana fay zonlarına reenjeksiyon yapılması, reenjekte edilen akışkanın üretim kuyularına (örn. Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahası) hızlı bir şekilde ulaşma riski nedeniyle olumsuz sonuçlara neden olabilir. Türkiye’de ve dünyada daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde reenjeksiyon stratejilerinin çok değişken olduğu görülmektedir. Reenjeksiyon süreci, farklı jeotermal sahalara göre değişiklik gösterir. Reenjeksiyon, beslenme alanının konumu ve diğer teknik parametrelere bağlı olarak, üretim alanının merkezinde, üretim alanının kenarında, dışında, üretim derinliğinde, üstünde veya altında da yapılmaktadır. Tüm bu uygulamalarda önemli olan ise jeotermal alanın sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Üretilen jeotermal akışkanın kimyasal özellikleri, bir jeotermal alan için uygun reenjeksiyon stratejisinin tasarlanmasında da önemli bir rol oynar. Rezervuarın performansını arttırmak ve sığ sirkülasyonu önlemek

için reenjeksiyondan rezervuara giden hızlı yollar, faylar ve kırıkların belirlenmesi ve dolayısıyla bölgenin jeolojik yapısının ayrıntılı olarak bilinmesi gerekir.

Jeotermal rezervardan aşırı üretim durumunda, basınç kaybı, su seviyesi düşüşü nedeniyle, rezervuar üzerindeki litolojik birimlerin ağırlığı azalarak, çökmeler meydana gelebilir. Kullanılan jeotermal akışkanın reenjeksiyonu, rezervuar basıncını koruyan ve herhangi bir rezervuar çökmesini önleyen rezervuar yönetimi için en iyi uygulamadır.

Reenjeksiyon kuyusu açıldıktan sonra, optimum üretim-reenjeksiyon miktarı dengesini belirlemek ve rezervuarda anormal sıcaklık ve basınç düşüşlerini önlemek için kuyu testleri (enjektivite, izleyici testleri, basınç düşümü ve yükselimi vb.) yapılmalıdır. Reenjeksiyon kuyularında en az 3 ayda bir, üretim kuyularında 6 ayda bir alınan su numunelerinde kabuklaşma ve korozyon problemlerine neden olabilecek parametre ve koşulların daha iyi anlaşılması için kimyasal analizler yapılması önemlidir. Kimyasal analizler de, sürdürülebilir üretim-reenjeksiyon sürecinin var olup olmadığı konusunda bazı önemli ipuçları vermektedir.

Bilindiği üzere, hem 5686 sayılı Kanun düzenlemeleri hem de jeotermal rezervuarların sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için, ısıtma ve elektrik üretimi amacı ile kullanılan jeotermal akışkanın rezervuara reenjekte edilmesi zorunludur. Bu işlemin, uygun lokasyon ve koşullarda yapılması, sadece rezervuarda uzun süreli basınç ve sıcaklık düşüşlerini önlemekle kalmaz, aynı zamanda da jeotermal akışkanın çevreye zarar vermemesini de sağlar. Bunun yanı sıra ruhsatlı jeotermal sahanın jeolojik özellikleri, geometrik şekli, uygun lokasyon bulunamaması nedeniyle, rezervuarda sıcaklık ve basınç düşüşlerine yol açmadan reenjeksiyon faaliyeti gerçekleştirilemeyebilir. Bu gibi durumlarda jeotermal akışkanın kontrollü üretimi sağlanarak rezervuara reenjeksiyon işlemi yapılamaz, beslenme bölgesi dışına reenjeksiyon gerçekleştirilebilir. Bu durumda, rezervuardan yüksek üretim yapmadan, jeotermal sistemin doğal geri beslenimi ile rezervuarın uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak gerekir. Jeotermal sahada yapılan araştırmalar reenjeksiyonun teknik olarak mümkün olmadığını gösteriyorsa, 5686 sayılı Kanun gereği, ruhsat sahibi ilgili Valilik üzerinden MTA'ya başvurularak reenjeksiyon yapamadığına dair teknik izin alması gerekir.

Yukarıdaki durumlarda, kullanılan jeotermal akışkan, jeotermal kaynağın sürdürülebilirliği için kritik olan basınç ve devamlılığı sağlayarak çevreyi, yüzey sularını, yüzeye yakın akiferleri etkilemeden, uygun formasyona yeraltına enjekte edilir. Jeotermal akışkanın rezervuarı geri besleme amacı olmadan bertaraf amaçlı yeraltına reenjeksiyonunun sadece teknik olarak zorunlu durumlarda uygulanması gerektiği unutulmamalıdır. Jeotermal rezervuar yönetiminde temel amaç, kaynağın uzun vadeli kullanımı ve sürdürülebilirliğini sağlamak için, kullanılmış jeotermal akışkanı, uygun bir mesafede, uygun formasyona yeniden enjekte etmektir (böylece enjekte edilen jeotermal akışkan rezervuara geri dönerken sıcak kayalar tarafından ısıtılır). Jeotermal akışkanın kimyasal özelliklerinden kaynaklanan kabuklaşma problemi, jeotermal sahalarda işletilmesinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biridir. Önlem alınmadığı durumlarda, kabuklaşma, kuyu üretimini, üretim-reenjeksiyon hattını, santraller dahil diğer tesisleri ve üretilen akışkanın reenjekte edilecek kimyasal özelliklerini dahi etkileyebilir. Bu nedenle jeotermal sahalarda reenjeksiyon stratejisi

belirlenirken kabuklaşma için de önlem almak gerekmektedir.

Bazı durumlarda, jeotermal akışkanın kullanılmayan bazı jeotermal üretim kuyularına reenjekte edilmesi reenjeksiyon stratejisi olarak uygulanmakta olsa da, bu tür bir uygulamanın jeotermal rezervuar ve üretim kuyularının soğumasına neden olabileceği unutulmamalıdır. Diğer bir düşünce ise aynı bölgede daha derin bir kuyu açarak jeotermal akışkanın reenjeksiyonunu sağlamak olabilir. Yapılabilecek diğer bir uygulama ise, mevcut jeotermal sahadan daha uzak mesafeye sondaj yaparak bu işlemi gerçekleştirmektir (Atılğan, 1994). Jeotermal akışkanın reenjeksiyon kuyuları ile rezervuara geri verilmesinde, açılacak kuyuların, sıcaklık ve basınç açısından üretim kuyuları veya rezervuarı olumsuz etkilemeyecek mesafede seçilmesi gerekir.

2.1. Yasal Düzenlemeler

5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ve Uygulama Yönetmeliği'nde, jeotermal kaynakların kullanımından sonra dönen termal akışkanın reenjeksiyon ve deşarjı için birçok düzenleme yapılmıştır. Kanunun 3. Madde-Tanımlar bölümü ile Uygulama Yönetmeliğinin 4. Madde-Tanımlar bölümünde "Reenjeksiyon: Üretilen jeotermal akışkanların yapay yöntemlerle kullanıldıktan sonra tamamının veya kalan kısmının üretildikleri jeolojik formasyonlara geri gönderilmesini/ basılması" olarak tanımlanmakta olup, Kanunun 14 üncü maddesinde ise, Reenjeksiyon koşullarının sağlanamaması durumunda deşarj ile ilgili olarak "(4) Ruhsat sahibi, kullanım sonrası açığa çıkacak akışkanı çevre limitlerini dikkate alarak deşarj edebilir. Akışkan içeriği çevre limitlerine göre deşarjı izin vermiyorsa reenjekte etmekle yükümlüdür. Ancak formasyonun fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle reenjeksiyonun gerçekleşmediğinin MTA tarafından onaylanması halinde, çevre kirlenmesini önleyecek tedbirler alınarak deşarj yapılır" hükümleri yer almaktadır.

Ayrıca, Uygulama Yönetmeliği'nin 23. Maddesi: Kaynak rezervuarlarının korunması bölümünde; "(2) Koruma alanı etüdünde rezervuarın korunmasına yönelik tedbirler; kaynağın işletmeye alınmasından önce yapılmış olan üretim testleri sonucunda belirlenen

rezervuar parametrelerine göre kuyu bazında ve bu kuyulardan alınabilecek toplam üretim miktarını, kullanımdan dönen akışkanın miktarı ve bu akışkanın yeraltına reenjeksiyonu için uygun lokasyonlar ve uygun kapasitede kuyu sayılarını, üretim testleri sırasında yapılmış ve yapılacak kimyasal testlerle çatlaklı zonların ve üretim kuyularının kısmen veya tamamen tıkanmasına yolaçacak bileşiklerin tespit edilmesi durumunda sürdürülebilir üretimin sağlanması için gerekli uygulamaları içerir” hükmü de yer almaktadır.

Uygulama Yönetmeliği'nin 24. Maddesi: Deşarj ve reenjeksiyon bölümünde ise reenjeksiyon uygulama şartlarının, çevre mevzuatı ile fiziksel ve kimyasal etkilerine ilişkin olarak da “(1) Ruhsat sahibi, kullanımdan dönen akışkanın kimyasal analizini akredite olmuş bir laboratuara yaptırır. Şayet akışkanın kimyasal bileşimi çevre limitlerini aşıyor ise öncelikle uygun yöntemlerle arıtılarak ilgili çevre mevzuatı limitleri altına düşürülür. Daha sonra uygun alıcı ortam belirlenir. Kullanımdan dönen akışkan, belirlenen alıcı ortama usulüne uygun şekilde deşarj edilir. Arıtma sonrası elde edilen akışkanın üç ayda bir kimyasal analizi yaptırılarak çevre limitlerini aşıp aşmadığı kontrol edilir. (2) Ruhsat sahibi, kullanımdan dönen akışkanın içeriği Çevre mevzuatında belirtilen çevre limitlerine göre deşarja uygun değil ise reenjekte etmekle yükümlüdür. Reenjeksiyon amaçlı belirlenen alanda önceden açılmış ve reenjeksiyon şartlarını sağlayan mevcut kuyu varsa değerlendirilir. Akışkanın reenjekte edileceği rezervuara olumsuz etkilerinin olup olmayacağı bir ön değerlendirme yapılarak belirlenir. Olumsuz etki söz konusu değil ise reenjeksiyon yapılabilir. Olumsuz etkisi var ise bu etki ortadan kaldırıldıktan sonra reenjeksiyon yapılır. Reenjeksiyon yapıldığı sürece gözlemler sürdürülür. Reenjeksiyonun rezervuar ve üretim değerleri üzerinde olumsuz etkilerinin gözlenmesi durumunda, reenjeksiyon işlemi durdurulur ve yeni bir lokasyon tespiti için araştırma yapılır. (3) Gerçekleştirilen çalışmalar reenjeksiyonun mümkün olmadığı sonucunu veriyorsa, bu durum tüm bilgi ve belgeler ile birlikte İdare tarafından MTA'ya iletilerek incelettilir ve gerekli ise masrafı ruhsat sahibi tarafından karşılanmak kaydıyla MTA tarafından yerinde tetkik yapılır. Formasyonun fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle işletme ruhsat sahasında reenjeksiyonun

yapılamayacağı MTA tarafından onaylanması halinde, çevre kirlenmesini önleyecek tedbirler alınarak deşarj yapılır. (4) Entegre jeotermal kaynak kullanım alanı dışındaki müstakil kaplıca ve doğal mineralli su işletmelerinde, reenjeksiyon ve enjeksiyon şartı aranmayabilir. Bu tip durumlarda akışkan çevre mevzuatı açısından ilgili Bakanlığın görüşü alınarak, belirlenen uygun alıcı ortama usulüne uygun şekilde deşarj edilebilir.” hükümleri yer almaktadır.

Uygulama Yönetmeliği'nin 25. ve 26. Maddeleri ise, jeotermal akışkanın entegre ve optimum kullanım koşullarına ilişkin hükümler içermektedir. Bu hükümlerde, “25-(4) Enerji üretimi ve ısıtma uygulamalarına uygun jeotermal akışkanlar hariç, diğer akışkanların bulunduğu alanlarda akışkan öncelikli olarak sağlık ve termal turizm amaçlı kullanılır. Bunun için akışkanla ilgili arama, araştırma ve geliştirme çalışmaları yapıldıktan sonra sağlık ve termal turizm amaçlı kullanıma uygun olup olmadığına ilişkin değerlendirme fiziksel, kimyasal veya endikasyon özelliğine göre ilgili İdarece yapılır. Bu alanlarda enerji üretimi ve ısıtma uygulamalarına konu jeotermal akışkanın, bu kullanımlardan sonra reenjeksiyon şartlarının müsaade ettiği aralıktaki sıcaklık ve debideki kısmının entegre olarak sağlık ve termal turizm amaçlı kullanılması sağlanır. Enerji ve ısıtmaya uygun jeotermal akışkanın bulunduğu sahalarda, enerji ve ısıtma amaçlı kullanımın veya talebin olmadığı veya kullanım potansiyelinin bulunmadığı durumlarda bu akışkanın sağlık ve termal turizm amaçlı kullanımına izin verilir”, “26-(4) (Değişik: RG-24/9/2013-28775) Entegre kullanıma uygun jeotermal akışkan işletme ruhsatına sahip, gerçek veya tüzel kişiler reenjeksiyon şartlarının müsaade ettiği aralıktaki sıcaklık ve debideki kendi ihtiyacından fazla jeotermal akışkanı öncelikle sera ve organik tarım ısıtmasında değerlendirilmesi zorunludur. Ruhsat sahibinin kendisinin sera kurmaması halinde, öncelikle mevcut seralara olmak üzere üçüncü kişilere idarenin onayı ile kiralanır. İdarece, işletme projelerinde bu fıkarda belirtilen hususların sağlanmış olması aranır. Kiralama bedeli alt ve üst limitleri idarece belirlenir. Kira bedeli belirlenirken en yakın kültür ve turizm koruma ve geliştirme bölgelerindeki belirlenen bedeller dikkate alınır” ifadeleri de yer almaktadır.

2.2. Reenjeksiyon Alanı ve Kuyu Lokasyonu Seçimi

Jeotermal sahanın tüm teknik özelliklerinin dikkate alınması ve uygun şartlarda reenjeksiyon yapılması, jeotermal kaynakların sürdürülebilirliğini sağlayan en önemli etmenlerden biridir. Özellikle jeolojik veriler (stratigrafi, tektonizma, hidrojeoloji), sondaj verileri (litostratigrafi, sıcaklıkta değişim), jeofizik veriler, kuyu logları, akış hızları, hidrojeokimyasal veriler (kaynak ve kuyu sıcaklıkları, kimyasal bileşimler) lokasyon seçiminde çok önemlidir. Reenjeksiyon kuyusu yerlerinin seçimini etkileyen ek faktörler, derin sirkülasyonla reenjeksiyon bölgesinden üretim bölgesine ulaşacak jeotermal akışkanın sıcaklığındaki değişimin öngörüsü olabilir.

2.2.1. Reenjeksiyon Kuyu Lokasyonları Belirlenmesinde Yeraltı Suyu Akım Haritalarının Kullanımı

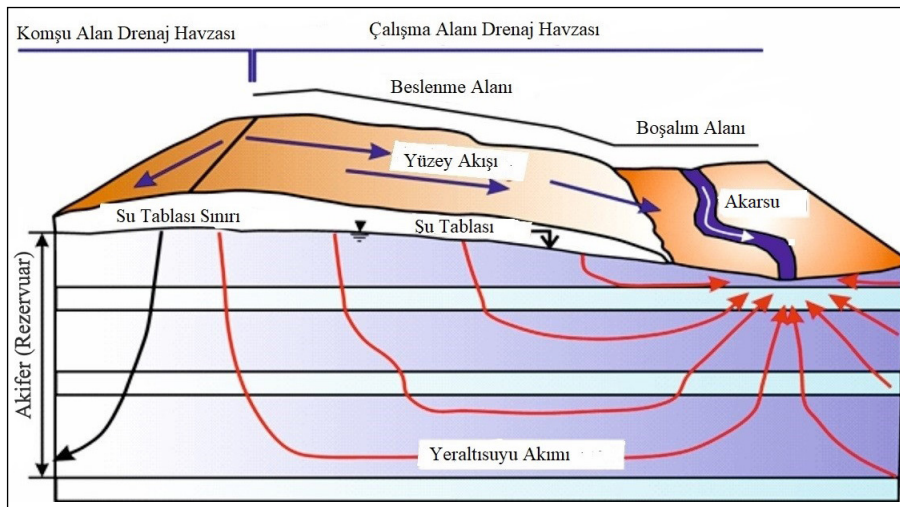
Jeoloji, stratigrafik birimler, tektonik yapılar (fay, graben), kuyu verileri, jeolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleri, rezervuar, örtü kaya ve tektonik parametreler yorumlanarak, akım koşulları ve olası reenjeksiyon alanları belirlenir. Bu durumda, bölgedeki beslenme ve boşalım bölgeleri arasındaki akış yolları, kırık hatları ve hidrokimyasal parametrelerin belirlenmesi, reenjeksiyon bölgesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Jeotermal sahada, suyun reenjeksiyon alanından üretim alanına sirkülasyon süresini, yönünü ve hareketini belirlemek için yeraltı suyu akış haritaları ve izleme testleri önemli

veriler vermektedir (Şekil 5). Hidrojeolojik haritalama için, yeraltı suyunun beslenme bölgesi ve akış yönü ile birlikte, yeraltı suyunun jeolojisi, hidrojeolojisi (hidrolojik, topografik, kuyu verileri), jeomorfolojisi ve hidrojeokimyasını iyi bilmek gerekir (Şekil 6 ve 7).

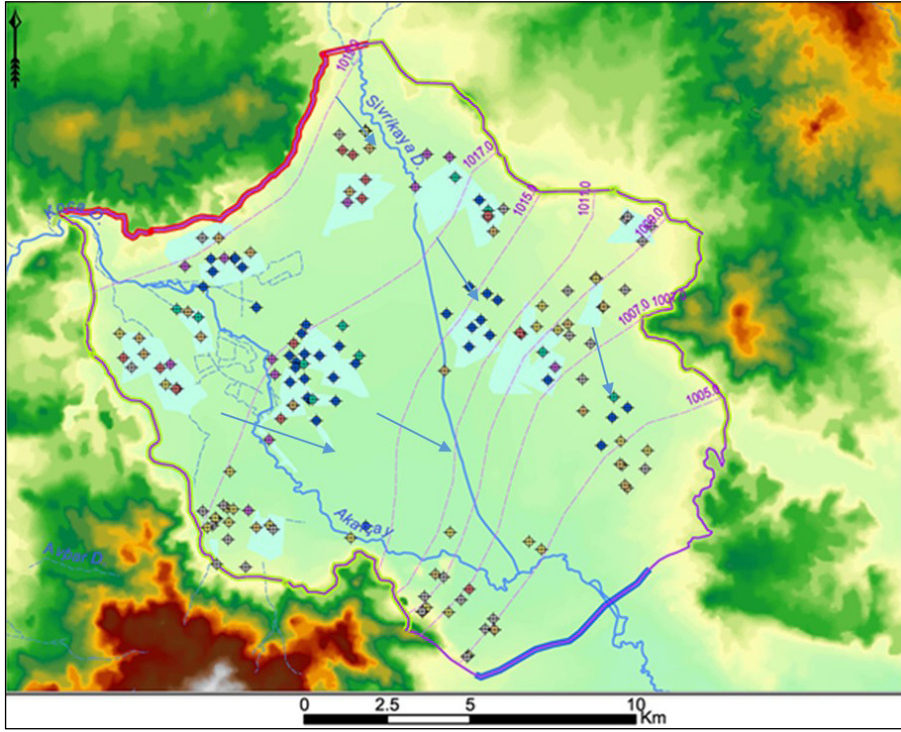
2.2.2. Reenjeksiyon Kuyu Lokasyonu Belirlenmesinde İzleyici Testlerinin Kullanımı

İzleyici testleri, yeraltı suyu akış yönü, hızı ve yeraltı sularındaki kirleticilerin yönü ile kaynağının belirlenmesi gibi amaçlarla hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı durumlarda ise, jeotermal sahada üretim-reenjeksiyon sistem dengesi ve sirkülasyonu belirlemek için en etkili yöntem izleyici testlerinin yapılmasıdır.

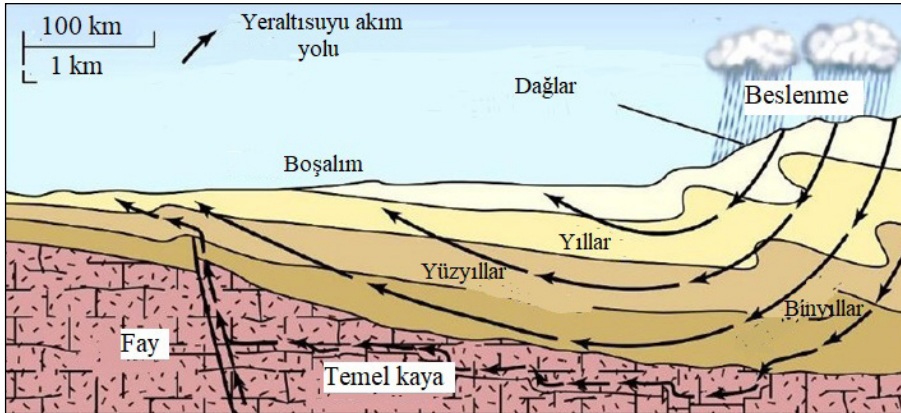
İzleyici testleri, jeotermal kaynak araştırma, geliştirme ve kaynak yönetiminde oldukça önemli bir araç haline gelmiştir. İzleyici testlerinin amacı temel olarak üçe ayrılabilir: (1) yeraltı suyu akış yönü ve hızının genel hidrolojik çalışmaları, (2) reenjeksiyon araştırması ve yönetimi ve (3) iki fazlı jeotermal akışkanları taşıyan boru hatlarında akış hızı ölçümleri. Aslında izleyici testleri, reenjeksiyon çalışmalarında çok daha önemli rol oynar. Bunun nedeni, izleme testlerinin reenjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki bağlantılar ve akış yollarının yönü ve özellikleri hakkında bilgi sağlamasıdır. Buna ilaveten kullanımdan dönen ve reenjekte edilen akışkanın, uzun dönemli sirkülasyonunda, üretim kuyularında soğuma olasılığını ve oranını da kontrol



Şekil 5- Yeraltı suyu drenaj alanı ve akım yönleri (Tezcan, 2000).



Şekil 6- Afyon ovasının yeraltısuyu akış yönü ve yollarını gösteren hidrojeoloji haritası (Doğdu, 2004).



Şekil 7- Yeraltısuyu akım yolları (Şirin, 2019).

eder. Bu tür tahminlerin yapılması aslında jeotermal uygulamalardaki izleme testlerini, yeraltı suyu hidrolojisi ve ilgili disiplinlerdeki izleme testlerinden ayırmaktadır (Axelsson, 2013).

İzleyici testlerinin oynadığı bir diğer önemli rol, özellikle EGS teknolojilerindeki olası reenjeksiyon operasyonlarında ısı transfer verimliliği ile ilgili olarak veri sağlayabilmesidir. İzleyici testlerinde kullanılan izleyicilerde yüksek hassasiyetli izleyiciler ile daha fazla sıcaklığa toleranslı izleyicilerin de geliştirilmesi

ile birlikte, izleyici testlerinde uygulanmasında da ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, jeotermal endüstrisinin diğer disiplinlerdeki bu gelişmeleri takip etmesi ve yeni teknoloji izleyicileri de benimsemesi gerektiği düşünülmektedir. Özellikle, şimdiye kadar sınırlı olan izleyici geri dönüş verilerinin modellenmesindeki gelişmeler, özellikle akış kanalı yüzey alanları ve hacimsel veri hakkında bilgi verebilen reaktif izleyici verilerinin modellenmesi önem arz etmektedir (Axelsson, 2013).

2.2.3. Duraylı İzotopların Reenjeksiyon Lokasyon Seçiminde Kullanılması

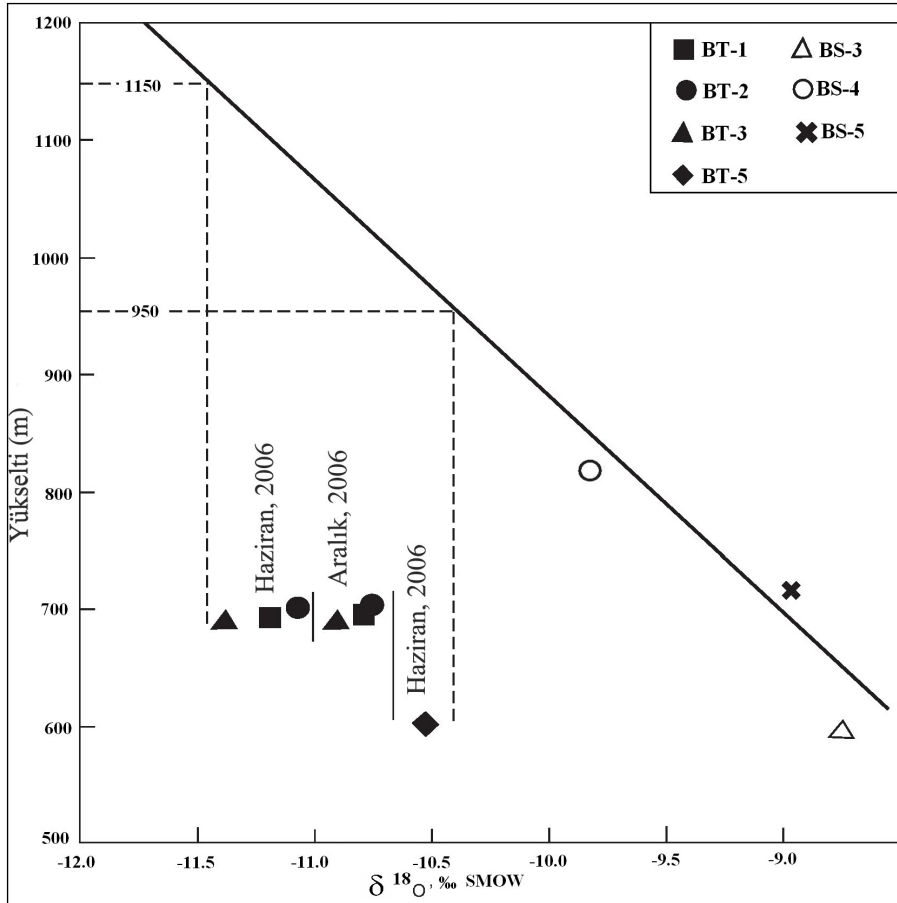
Jeotermal sahalarda, reenjeksiyon yerlerinin belirlenmesinde en önemli unsurlardan biri, bölgedeki jeotermal rezervuarın beslenme bölgesinin belirlenmesidir. Bu tespit, reenjekte edilen sıcak suyun orta-uzun vadeli sirkülasyonda yeniden ısınması ve böylece reenjekte edilen akışkanın üretim alanına ulaşmadan rezervuar kayaçları tarafından ısıtılması açısından çok önemlidir.

Besleme bölgesini bulmak için kullanılan yöntemlerden biri de beslenme yüksekliğinin belirlenmesidir. Beslenme yüksekliği belirlenirse, bölgenin jeolojisi ve suyun hidrokimyasal özellikleri birlikte değerlendirilebilir ve böylece jeolojik ve hidrojeolojik verilerle birlikte jeotermal rezervuarın beslenme alanı öngörülebilir.

Jeotermal suyun beslenme yüksekliğini belirlemek için kararlı izotoplar kullanılır (Şekil 8).

Bilindiği gibi hidrolojide kullanılan başlıca kararlı izotoplar, suyun yapısındaki oksijen ve hidrojenin izotoplarıdır. Hidrojen elementinin kütle numarası 1 olan ^1H -hidrojen izotopu %99,985 ile doğadaki en yüksek bolluğa sahiptir, kütle numarası 2 olan ağır izotop ^2H -döteryum ise daha az yaygındır. Oksijen ve hidrojenin kararlı izotopları, jeotermal sularda genellikle suyun dolaşımını aydınlatmak, su-kayaç etkileşiminin boyutunu ortaya çıkarmak ve jeotermal kaynağın beslenme yüksekliğini belirlemek için kullanılır.

Yağışlardan elde edilen oksijen-18 ve döteryum izotopları, bölgelerin sıcak su kaynaklarının beslenme alanını belirlemek için kullanılabilir (Mazor, 1991). Bunun yanında atmosferdeki su buharının izotopik oranı deniz seviyesinden yükseldikçe ağır izotoplar açısından fakirleşir. Aynı zamanda izotop içeriğinde, yükseklikle birlikte bir azalma da olur. Bölgesel olarak değişmekle birlikte yağış suyunun ^{18}O izotop değeri her 100 metre yükselti artışına rağmen binde



Şekil 8- Bey pazarı bölgesi sularının Oksijen-18 (d^{18}O) –yüksekti diyagramı (Çelmen, 2008).

0,15-0,5 arasında azalabilmektedir. Bu bilgilere dayanarak, herhangi bir suyun oksijen-18 izotop içeriği biliniyorsa, o suyun beslenme yüksekliğini belirlemek mümkündür (Şekil 8).

Bir jeotermal rezervuarın beslenme yüksekliğinin belirlenebilmesi için öncelikle bölgedeki yağışın oksijen-18 ve/veya döteryum içeriğinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu verilere her zaman ulaşılmadığından yağışların kısa sürede yeraltına süzülmesi sonucu oluşan soğuk su kaynaklarının oksijen-18 verileri de yağış verisi olarak kullanılabilir. Böylece yağışın kısa sürede yeraltına süzülmesi sonucu oluşan soğuk kaynak suyunun yükseklik ve kararlı izotop değeri ile sıcak suların yükseklik ve kararlı izotop değeri karşılaştırılır.

Ankara-Bey pazarı bölgesinde yer alan bazı sıcak su kaynaklarının (BT-1, BT-2, BT-3, BT-5) beslenme yüksekliğini belirlemek için Çelmen (2008) tarafından üç soğuk su kaynağı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan su örnekleri İliçakpınar kaynağından BS-3, Dikmen kaynağından BS-4 ve Tahirlere acısu kaynağından BS-5 alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, Bey pazarı bölgesi sıcak su kaynaklarının 950-1150 metre arasında bir beslenme yüksekliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanındaki jeotermal kaynağın beslenme yüksekliği belirlendikten sonra suyun hidrokimyasal özellikleri, bölgedeki hidrojeolojik döngü, bölgenin tektonik ve jeolojik yapıları değerlendirilerek jeotermal kaynağın beslenme alanı belirlenmiştir.

Beslenme alanı belirlendikten sonra, jeotermal akışkanın orta ve uzun vadede tekrar ısınıp

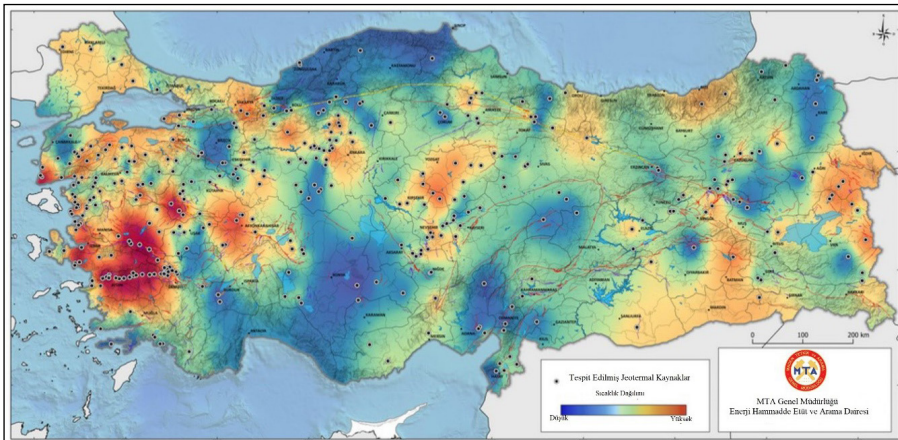
rezervuara ulaşabileceği uygun bir reenjeksiyon yeri seçilmelidir. Reenjektörde edilen jeotermal akışkan çok kısa sürede rezervuara/üretim kuyularına ulaşırsa rezervuarda sıcaklığın düşmesine neden olacaktır. Bu olumsuz durum Türkiye’de bazı jeotermal sahalarda görülmektedir.

2.3. MTA Çalışmaları İle Belirlenen Reenjeksiyon Kuyuları ve Lokasyonları

Türkiye’de jeotermal enerji araştırma çalışmaları 1962 yılında MTA tarafından başlatılmıştır. MTA tarafından hazırlanan Türkiye’deki jeotermal kaynakların dağılımı Şekil 9’da gösterilmektedir. Bu çalışmalar ile farklı sıcaklıklara sahip birçok jeotermal saha keşfedilmiş ve hükümlere uygun olarak yatırım için ihale edilmiştir. 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ve Uygulama Yönetmeliği. Jeotermal enerjinin elektrik üretimi, sera ısıtma ve konut ısıtma amaçlı kullanıldığı birçok jeotermal sahada belediyeler ve birçok şirket tarafından reenjeksiyon denemeleri ve uygulamaları devam etmektedir.

2.3.1. Denizli-Kızıldere Jeotermal Alanı

Denizli-Kızıldere jeotermal sahasında jeotermal arama etütleri MTA tarafından 1968 yılında bölgede jeolojik, jeofizik, jeokimyasal, sondaj ve test çalışmaları ile başlatılmış olup hali hazırda bu jeotermal saha şu anda enerji üretimi için kullanılmaktadır. MTA tarafından yürütülen çalışmalarda 10 adet üretim ve 9 adet reenjeksiyon kuyusu açılmıştır.



Şekil 9- Türkiye’deki jeotermal alanların dağılımı.

İşletme ruhsat sahası, Zorlu Enerji tarafından Başbakanlık Özelleştirme İdaresi Başkanlığı'ndan ihale yoluyla satın alınmış ve ruhsat sahasında jeotermal enerji üretimi için toplam 89 adet kuyu açılmıştır. Bu sondajlardan elde edilen akışkan 17,5 MWe kurulu güce sahip Kızıldere I Jeotermal Enerji Santrali (JES), 80 MWe kurulu güce sahip Kızıldere-II JES ve 165 MWe kurulu güce sahip Kızıldere JES-III'de kullanılmaktadır (Şekil 10).

Üretilen tüm jeotermal akışkanlar, üretim sahasının kenarında bulunan reenjeksiyon sistemi ile rezervuara geri enjekte edilmektedir.

2.3.2. Kütahya-Simav-Eynal-Çitgöl-Naşa Jeotermal Alanı

Simav-Eynal-Çitgöl-Naşa jeotermal sahasında 1985 yılından bu yana MTA Genel Müdürlüğü ve Simav Belediye Başkanlığı tarafından sondaj çalışmaları yapılmakta ve sondajlardan elde edilen jeotermal akışkan konut ısıtma, sera ısıtma ve termal amaçlı kullanılmaktadır. Bölgede 40 adet üretim ve 2 adet reenjeksiyon kuyusu bulunmaktadır. Kuyuların üretim sıcaklıkları yaklaşık olarak 45°C -136°C arasında, reenjeksiyon sıcaklıkları ise 60°C-75°C arasında değişmektedir (Doğdu vd., 2019). Simav ilçesinde jeotermal enerji 13.400 Ke (konut eşdeğeri) ve ayrıca 265 dekar sera ısıtması ve termal amaçlı kullanılmaktadır. Simav-Eynal jeotermal sahasında Y-1 kuyusu reenjeksiyon amacıyla kullanılmaktadır. Çitgöl bölgesindeki jeotermal kuyulardan 1.200 Ke

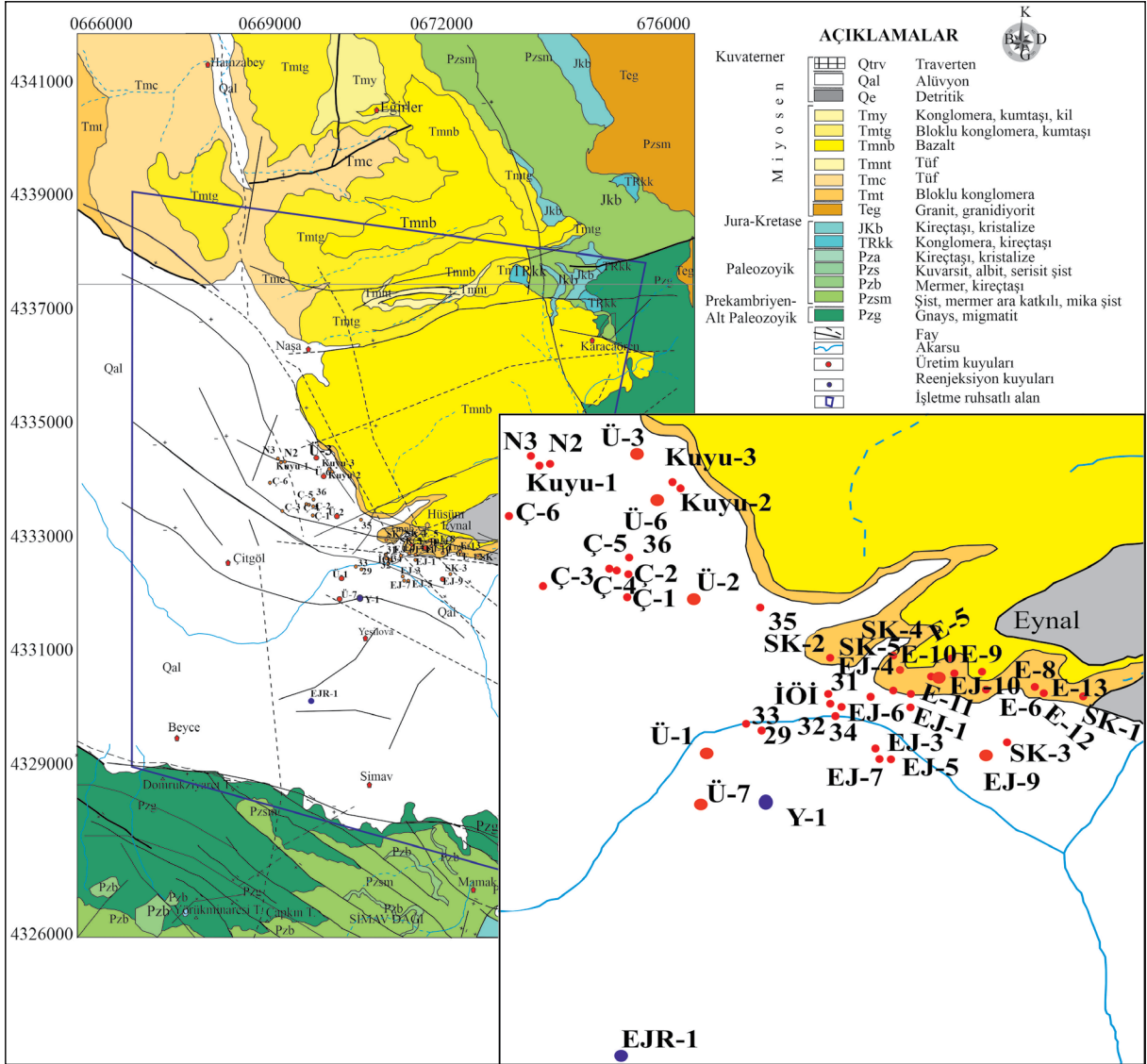
konutun ısıtılması, 130 dekar sera ısıtması ve termal amaçlı yararlanılmaktadır. Naşa'daki kuyular ise kaplıca tesislerinde termal amaçlı kullanılmaktadır. Kış aylarında kullanımdan dönen jeotermal akışkanın mevcut Y-1 kuyusuna reenjekte edildiği ancak bunun jeotermal rezervuarın sürdürülebilirliği için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu kapsamda, MTA'nın jeolojik, jeofizik ve diğer verilerinin multidisipliner değerlendirmesi sonucu reenjeksiyon alanı belirlenmiş, tüm kullanımdan dönen akışkanın reenjeksiyonu amacıyla EJ-1 reenjeksiyon kuyusu MTA tarafından, Simav Belediyesi adına 2022 yılında açılmıştır (Şekil 11) (Doğdu vd., 2022). Ancak gözlemlere ve jeotermal sahanın jeotermal kullanımına göre o bölgede jeotermal kaynağın uzun vadeli sürdürülebilirliği için en az 2-3 reenjeksiyon kuyusuna ihtiyaç olduğu görülmüştür.

2.3.3. Nevşehir-Kozaklı Jeotermal Alanı

Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahası, mevcut verilere göre orta entalpili bir jeotermal sistem olarak değerlendirilmektedir. Bu jeotermal sahada 1965 yılından itibaren MTA Genel Müdürlüğü ve Belediye tarafından sondaj çalışmaları yapılmaktadır. Sondajlardan elde edilen jeotermal akışkan Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahasında konut ısıtma, sera ısıtma ve termal amaçlı kullanılmaktadır. Alanda 2.294 konut ısıtması, 67.000 m² sera ısıtması ve 28 termal tesis termal amaçlı kullanım bulunmaktadır. Ayrıca sahada 25 adet üretim ve 1 adet reenjeksiyon kuyusu bulunmaktadır (Şekil 12). Kuyuların üretim sıcaklıkları yaklaşık olarak 36°C-92°C arasında, reenjeksiyon sıcaklıkları ise 50°C-55°C arasında değişmektedir. Jeotermal akışkan NEVJET AŞ tarafından dağıtılmaktadır. Jeotermal akışkan, 1.500 ton kapasiteli toplama/dağıtım tankından konut ısıtma ve termal amaçlı abonelere, kullanımdan dönen akışkan ise 500 ton kapasiteli reenjeksiyon tankından reenjeksiyon kuyusuna geri gönderilmektedir. MTA tarafından yapılan etütlerle Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahasında 2 adet reenjeksiyon kuyusu yeri belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda belirlenen 1 adet reenjeksiyon kuyusu yetkililer tarafından açılmış olup halen reenjeksiyon amacıyla kullanılmaktadır. Nevşehir – Kozaklı jeotermal sahasında MTA tarafından yapılan etüt çalışmalarına göre jeotermal sahanın sürdürülebilirliğinin sağlanması ve rezervuarın üretim-reenjeksiyon dengesi için sahada



Şekil 10- Kızıldere-3 Jeotermal Enerji Santrali.

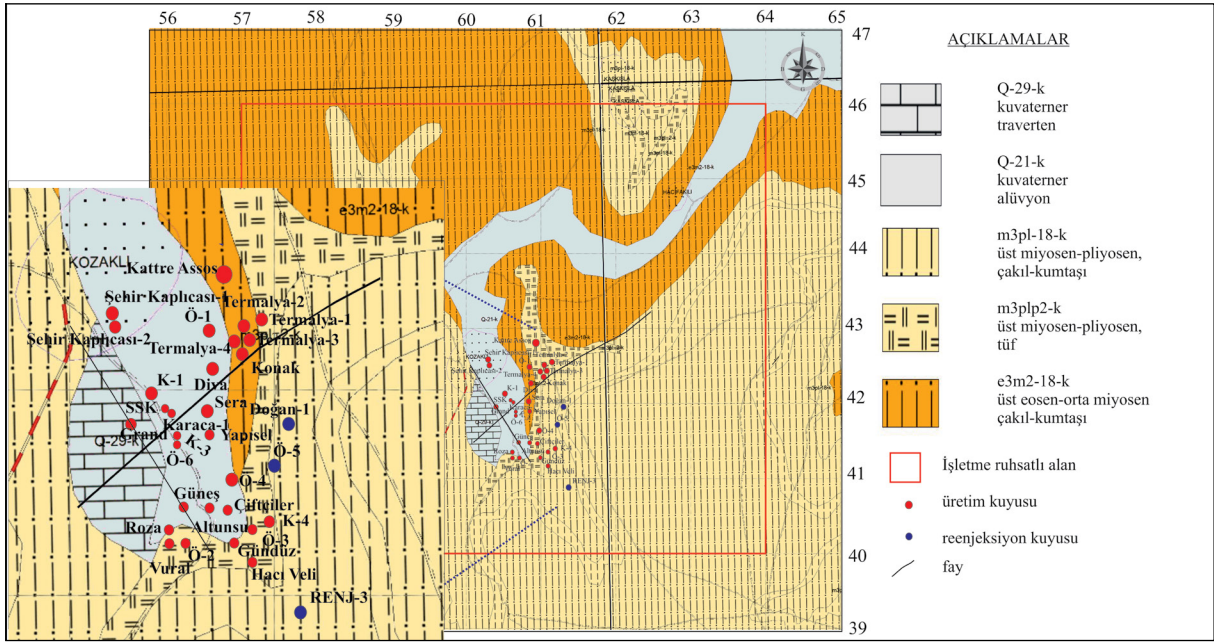


Şekil 11- Kütahya-Simav-Eynal-Çitgöl-Naşa jeotermal alanı (Doğdu vd., 2022).

sürekli kullanılan jeotermal kuyuların tam kapasite ile çalıştırılmaması önerilmektedir. Entegre kullanım açısından, konut ısıtma ve sera ısıtma uygulamaların kullanımından sonra jeotermal akışkan termal amaçlı olarak değerlendirilmelidir. Sonuç olarak jeotermal sahanın sürdürülebilirliğini sağlamak için kullanımdan dönen jeotermal akışkanın reenjeksiyonu 55°C-60°C'nin altındaki sıcaklıklarda yapılmamalıdır.

Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahasında 2007 ve 2019 yıllarında 90 x 70 metre ve 22,3 x 21 metre çapında iki obruk (Kozaklı-1 ve Kozaklı-2) oluşmuştur (Şekil 13). Bu durumun uygun bir reenjeksiyon stratejisinin uygulanamaması ve jeotermal kuyulardan

optimum üretimin yapılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mevcut kuyulara ek olarak, talep edilen yeni kuyular jeotermal rezervardan daha fazla jeotermal akışkan üretecektir ve jeotermal sahanın sürdürülebilirliğini sağlamak için kuyular arası girişim testi yaparak sonuçlarına göre tüm kuyuların daha kontrollü kullanımının sağlanması uygun olacaktır. MTA tarafından belirlenen reenjeksiyon alanında yeni bir reenjeksiyon kuyusu açılması uygun olacaktır. Ancak reenjeksiyon hacminin jeotermal rezervuarı olumsuz etkilememesi için mevcut reenjeksiyon ve üretim kuyularının en az iki dönem izlenmesi de iyi bir strateji olacaktır.



Şekil 12- Nevşehir-Kozaklı jeotermal alanı (Doğdu vd., 2018).



Şekil 13- a) Kozaklı-1 obruğu (2007) ve b) Kozaklı-2 obruğu (2019).

Jeotermal rezervuarın sürdürülebilirliğini sağlamak için bazı alanlarda üretim-reenjeksiyon dengesinin kritik durumda olduğu açıktır. İyi bir üretim-reenjeksiyon politikası ile bu jeotermal denge sağlanırsa, üretim kuyularından kütle çekimi nedeniyle ani su seviyesi değişimlerinden kaynaklanan yeni obruk oluşumları önlenir.

2.3.4. Afyon-Sandıklı Jeotermal Alanı

Sandıklı jeotermal sahasında MTA tarafından yürütülen danışmanlık çalışmaları çerçevesinde gerçekleştirilen jeofizik, jeolojik etütler ve hidrojeolojik değerlendirmeler sonucunda reenjeksiyon alanı belirlenmiş ve reenjeksiyon kuyusu (AFS-188) açılmıştır. Mevcut durumda Afyon-Sandıklı jeotermal kaynak işletme ruhsat alanı SANJET AŞ tarafından kullanılmaktadır. Yetkililerle yapılan görüşmelere göre, 19.200 Ke (33.000 konuta eşdeğer) ve 24 sera (1.500.000 m²) jeotermal enerji ile ısıtılmaktadır. Alanda yaklaşık 70°C-75°C sıcaklıkta 1.200 m³-1.500 m³ jeotermal akışkan ısı merkezi deposunda toplanmaktadır. 1.200 m³-1.500 m³ jeotermal akışkanın yaklaşık 40°C-45°C sıcaklıkta reenjekte edildiği bilgisi yetkililerden alınmıştır. Afyon İl Özel İdaresi'nden alınan kuyu bilgilerine göre Afyon-Sandıklı jeotermal kaynak işletme ruhsat sahasında kayıtlı 33 adet üretim ve 4 adet reenjeksiyon kuyusu bulunmaktadır.

Sahada bulunan jeotermal akışkan hem termal turizm hem de alan ısıtma amaçlı (konut ve sera) kullanılmaktadır. Jeotermal kuyu çalışmaları, üretim ve girişim testleri sonucunda bir plan dahilinde yapılmalı ve jeotermal kaynağın sürekliliğini sağlamak için uygun koşullarda akışkanı tekrar enjekte etmelidir. Reenjeksiyonun jeotermal sisteme

etkisi kuyu testleri ile takip edilmeli ve ayrıca 5686 Sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ve Uygulama Yönetmeliğinde belirtilen tedbir ve faaliyetler dikkate alınmalıdır.

Ayrıca MTA'nın daha önceki Kaynak Koruma Alanı raporlarında verdiği teknik görüşlerde de belirtildiği gibi sahada sürekliliğin sağlanması için özellikle Hüdai kaplıcalarından İnpınarı mevkiine uzanan koridorda yeni kuyular açılmamalıdır (Tamgaç vd., 2012). Ayrıca bu MTA çalışmasında Tozkoparan Tepe kuzeyinde, Şaban kuyu mevkii, Savurmaz Harmanları, Gülbahçe mevkii hattı ve Sipsin Damları güneyinde, Koruçayı mevkii ve Cinsigüzel mevkii hattında yeni üretim kuyularının açılması önerilmektedir. Jeotermal sahanın sürdürülebilirliğini sağlamak için uygun reenjeksiyon stratejisine göre üretim kuyuları ile birlikte jeotermal sahasının sürekli izlenmesi önem arz etmektedir.

2.3.5. Afyon-Merkez-Ömer-Gecek Jeotermal Alanı

Afyon Merkez-Ömer-Gecek jeotermal sahası AFJET AŞ tarafından elektrik üretimi, konut ısıtma, sera ısıtma ve diğer termal amaçlar için işletilmektedir. Bu jeotermal saha üretim-reenjeksiyon sistemi ile işletilmektedir.

Ömer-Gecek jeotermal alanında yapılan arazi gözlemlerinde AFJET AŞ üretim kuyularının yakınında bazı reenjeksiyon kuyuları kullandığı görülmüştür. 2016 yılında Afyon Valiliği'nin talebi üzerine üretim kuyularını etkilemeyecek şekilde MTA tarafından yeni bir reenjeksiyon alanı belirlenmiştir. Reenjeksiyon lokasyonlarının belirlenmesi için daha önce yapılmış jeolojik, jeofizik ve hidrojeolojik çalışmaların değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.3.6. Afyon-Çobanlar Jeotermal Alanı

Afyon-Çobanlar jeotermal sahasında Çobanlar Belediyesi'ne kayıtlı 6 adet kuyu bulunmaktadır. Bu alanda jeotermal kuyulardan sera ısıtma ve termal turizm amaçlı yararlanılmaktadır. Seranın ısıtılmasında kullanılan jeotermal akışkanın yaklaşık 3,5 km taşındıktan sonra giriş sıcaklığının 57°C-58°C, çıkış sıcaklığının ise 32°C-35°C olduğu sera yetkililerinden öğrenilmiştir. 2016 yılında Afyon Valiliği'nin talebi üzerine MTA tarafından rezervuar, üretim kuyuları ve yeraltı suyu akış yönü araştırmalarını içeren çalışmalar yapılmıştır.

2.3.7. Elazığ-Cipköy Jeotermal Alanı

2020 yılında Elazığ Belediyesi'nin talebi doğrultusunda MTA tarafından Elazığ-Cipköy jeotermal sahasında yerinde incelemeler yapılmıştır. Önceki yıllarda yapılan çalışmalar dikkate alınarak rezervuarın sürdürülebilirliğinin sağlanması için yeni bir reenjeksiyon alanı belirlenmiştir. Ayrıca MTA, jeotermal akışkanların optimum debilerde kullanılmak üzere üretilmesini ve sera ısıtmasında kullanıldıktan sonra reenjekt edilmesini önermiştir.

Yapılan tüm jeolojik, jeofizik, hidrojeolojik ve izotopik çalışmalar değerlendirilerek, jeotermal rezervuarın olası beslenme yüksekliğinin 1.300 metre – 1.500 metre arasında olabileceği önerilmektedir. Bu yükseklikte, sistemin olası beslenmesi litolojik olarak jeotermal alanın kuzey-kuzeybatısında yer alan mermer (Paleozoyik)-kireçtaşı (Neojen) birimlerinden olabilir. Bu nedenle, ruhsat sınırına yakın Poyraz ve Pelteköy lokasyonlarına yeni jeotermal reenjeksiyon kuyularının açılması önerilmiştir.

3. Sonuçlar

Reenjeksiyon, jeotermal enerji üretiminin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini en üst düzeye çıkarmada çok önemli bir rol oynar. Bu açıdan bakıldığında, jeotermal kaynakların sürdürülebilirliğinin sağlanması ve üretim-reenjeksiyon dengesi politikasının sürdürülebilmesi bu kaynakların korunmasına bağlıdır.

Öncelikle, reenjeksiyon rezervuar basıncının korunmasına yardımcı olarak uzun vadeli ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlamaktadır. Jeotermal rezervuarlar doğal olarak basınçlıdır ve enerji üretimi için akışkan üretimi zamanla basıncın düşmesine neden olabilir. Bu durum, enerji azalmasına veya hatta rezervuarın sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyebilir. Ancak kullanımdan dönen jeotermal akışkanın doğru koşullarda ve lokasyonlarda reenjekt edilmesiyle basıncın korunacağı, sürekli ve güvenilir jeotermal enerji üretimi sağlanacağı düşünülmektedir.

Jeotermal akışkanlar, günümüz teknolojisinde ekonomik olmayabilecek ancak çeşitli endüstriyel ve tarımsal amaçlar için kullanılacak değerli mineraller ve çözünmüş maddeler içerebilir. Kullanımdan dönen jeotermal akışkan reenjekt

edildiğinde, değerli mineraller ve çözülmüş maddeler korunabilir ve teknoloji ilerledikçe bu potansiyel değerlendirilebilir.

Reenjeksiyon ayrıca çevresel etkilerin azaltılmasına da yardımcı olur. Jeotermal akışkanlar genellikle doğa için olumsuz etkileri olabilecek ağır metaller ve çözülmüş gazlar içerir. Bu sıvılar uygun şekilde yönetilmez ve bertaraf edilmezse, ekosistemler ve yeraltı suyu kalitesi için risk oluşturabilirler. Ancak jeotermal akışkanların rezervuara reenjekte edilmesiyle kirlenme potansiyeli en aza indirilir ve çevredeki ekosistemler ile su kaynaklarının korunması sağlanır.

Reenjeksiyon lokasyonun belirlenmesi, jeolojik veriler (stratigrafi, litoloji, tektonizma, hidrojeoloji), sondaj verileri (litostratigrafi, tanımlar, derinlikte değişen sıcaklık, kuyular, kimyasal bileşimler), jeofizik veriler, kuyu logları, akış hızları, hidrojeokimyasal veriler (kaynak sıcaklıkları) ile araştırılmaktadır. Ayrıca akış haritaları, izleme testleri ve kararlı izotop çalışmaları ile desteklenmektedir. Jeotermal sistemin beslenme alanını belirlemek, kuyulardaki kabuklaşma sorunları veya reenjekte edilen akışkanın sığ dolaşım ile jeotermal rezervuarı soğutmak gibi reenjeksiyonun olası olumsuz etkilerinden kurtulmak için de bu veriler birlikte değerlendirilmelidir.

Bazı durumlarda, ruhsat sahasının coğrafi yapısından dolayı (düzensiz şekilli veya küçük boyutlu), reenjeksiyon yerlerinin belirlenmesi zor hatta imkansız olabilir. Bu durumda kullanılan jeotermal akışkanın reenjeksiyon veya deşarj politikası Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından Jeotermal Kanun (5686 sayılı) kapsamında değerlendirilmektedir.

Son olarak, bir jeotermal sistemde reenjeksiyon kuyusunun belirlenmesi sürdürülebilir enerji üretimi için çok önemli olmakla birlikte, üretim ve reenjeksiyon dengesinin sürekli izlenmesi de çok önemlidir. Bu izleme üretim- reenjeksiyon kuyularında olası değişiklikler ile rezervuar parametrelerinde (basınç, sıcaklık, hidrokimyasal vb.) uzun süreli rezervuar takibi ile yapılmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışmada, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü Enerji Hammade Tetkik ve Arama

Dairesi Başkanlığı tarafından yürütülen jeotermal enerji etüt ve sondaj çalışmaları ile jeotermal kaynak koruma alanı etütleri kapsamındaki çalışmalardan yararlanmıştıdır. Yazarlar bu projelerde görev yapan teknik ve idari personel ile Denizli Valiliği, Kütahya Valiliği, Simav Belediyesi, Nevşehir Valiliği, Kozaklı Belediyesi, Afyon Valiliği, Elazığ Valiliği ve Elazığ Belediyesi yetkililerine katkılarından dolayı teşekkür ederler.

Değinilen Belgeler

- Atılgan, M. 1994. Jeotermal Kaynaklarda Re-enjeksiyonun Önemi. Jeotermal Uygulamalar Sempozyumu, 27-30 Eylül 1994, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 56-60.
- Axelsson, G. 2013b. Tracer tests in geothermal resource management. In EPJ Web of Conferences (Vol. 50).
- Barbier, E.2002. Geothermal energy technology and current status: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 6(1-2):3-65.
- Çelmen, O. 2008. Sivrihisar ve Beypazarı Arasındaki Termal ve Mineralli Kaynakların Hidrojeokimyasal ve İzotopik Olarak İncelenmesi (Türkçe). Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, 239, Ankara, Türkiye
- Doğdu, N. 2004. Afyon Ovası Hidrojeolojik Özelliklerinin İndikatör Jeostatistiği ve Evrik Modelleme Teknikleriyle Belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, 66, Ankara, Türkiye .
- Doğdu, N. Orakcı, A. Atmaca, İ. Akar, M. Duran, Y. 2018. Kozaklı (Nevşehir) 2007/18 numaralı işletme ruhsatına ilişkin Kaynak Koruma Alanı Etüt Raporu, MTA Genel Müdürlüğü. Rapor No: 13746. 122, Ankara, Türkiye (yayımlanmamış)
- Doğdu, N. Aydoğdu, Ö. Akar, A. Şahan, M. Akar, M. Duran, Y. Bilgiç, Ö. 2019. Simav-Eynal-Çitgöl-Naşa (Kütahya) 105 numaralı işletme ruhsatına ilişkin kaynak koruma alanı etüt raporu. MTA Genel Müdürlüğü. Rapor No: 13813. 244, Ankara, Türkiye (yayımlanmamış)
- Doğdu, N. Şahan, M. Tamgaç, Ö. F. Öztel, İ. Akar, A. Güven, A. Toy, E. Atmaca, İ. 2022. Kütahya İl Özel İdaresi adına tescilli 105 nolu jeotermal kaynak işletme ruhsat sahası Ü-1, Ü-2, Ü-3, Ü-6 jeotermal araştırma sondajları kuyu bitirme raporu. MTA Genel Müdürlüğü. Rapor No: 14076. 122, Ankara, Türkiye (yayımlanmamış)

- Kamila, Z. Kaya, E. Zarrouk, S.J. 2021. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020. *Geothermics*. Volume 89.
- Mazor, E. 1991. *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Open University Press, Suffolk, 274.
- Roberts, D. 2020. Geothermal energy is poised for a big breakout, www.vox.com.
- Şirin, Ö. 2019. Yeraltısuyu akışı, yeraltısuyu boşalımı ve Darcy Kanunu, <https://docplayer.biz.tr>.
- Tamgaç, Ö.F. Doğdu, N. İncegil, F. Ünal H. Akar, M. 2012. Sandıklı (Afyonkarahisar) jeotermal alanına ait kaynak koruma alanları etüt raporu. MTA Genel Müdürlüğü. Rapor No: 11526. 74, Ankara, Türkiye (yayımlanmamış)
- Tezcan, L. 2000. *Groundwater Models*. Ders Notları. Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü. Ankara, Türkiye (yayımlanmamış).
- Vitaller, A.V. Angst, U., Elsener, B., 2019. Corrosion Behaviour of L80 Steel Grade in Geothermal Power Plants in Switzerland, *Metals - Open Access Metallurgy Journal* 9(3), 331.
- White, D.E. 1973. Characteristics of Geothermal Resources. in P. Kruger and C. Otte, eds., "Geothermal Energy: Resources, Production, Stimulation" (Stanford University Press, Stanford,, 69 - 94.