



Bu bir MMO
yayıdır

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

TEKRAR-BASMA (REENJEKSİYON) ve TÜRKİYE'DEKİ UYGULAMALARLA İLGİLİ GÖZLEMLER

ABDURRAHMAN SATMAN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

TEKRAR-BASMA (REENJEKSİYON) VE TÜRKİYE'DEKİ UYGULAMALARLA İLGİLİ GÖZLEMLER

Reinjection and Observations Related to Applications in Turkey

Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Türkiye'de bilinen ve işletilen tüm jeotermal rezervuarlar basınçlı sıvı suyun etken olduğu sistemlerdir. Suyun etken olduğu jeotermal rezervuarlardan yüksek miktarda sıcak su üretimi yapılır. Gerek doğrudan kullanım tesislerinde ve gerekse de jeotermal elektrik santral işletiminde, üretilen suyun bir kısmı gaz ve buhar olarak ayrıştırıldıktan ve/veya ısısı alındıktan sonra geri kalan önemli bir miktarı artık su olarak kalır. Yasal ve çevre koşullarının uygun olması durumunda, artık su saha yakınındaki akarsu, deniz ve göl gibi yerlere verilebilirse de, her jeotermal sahanın yakınında bu tür olanaklar bulunmayabilir. Kaldı ki olsa bile hem en doğru çözüm değildir ve hem de bazı çevre sorunları kaçınılmazdır. Doğru olanı, suyun geldiği yere (rezervuara) basılmasıdır.

Jeotermal sahanın işletilmesinde, suyun üretiminin ve rezervuara basılmasının birlikte düşünülmesi, planlanması, tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir.

Suyun geldiği yere yani jeotermal rezervuara basılması durumunda önemli yararlar sağlanabilir. Bilindiği gibi üretimden dolayı boşaltılan rezervuar hacminin bir kısmı doğal beslenme suyuyla doldurulur. Ancak doğal beslenme ile rezervuara giren su miktarı, üretim yoluyla rezervuardan ayrılan su miktarını dengelemeyebilir veya dengelenme süresi uzun sürebilir ve rezervuar basıncı (veya kuyucu seviyesi) düşer. Özellikle basınçlı sıvı suyun etken olduğu Türkiye'deki jeotermal sistemlerde bu sorun oluşur. Bu sorunun çözümü artık suyun geldiği yere basılmasıdır. Böylece rezervuar basıncı korunmuş olur.

Reenjeksiyon işleminin üç önemli amacı vardır: (1) Yeryüzünde üretildikten sonra kalan artık sudan kurtulmak, (2) Rezervuar basıncını korumak, (3) Rezervuardan daha fazla ısı üretimini sağlamak. Tasarımında ise enjeksiyonun yapıldığı rezervuar kalınlığı, enjeksiyon debisi, enjeksiyon-üretim kuyuları aralığı ve basılan suyun sıcaklığı önemli parametreler olarak dikkate alınırlar.

Sahada tekrar-basma uygulamasına geçmeden önce enjektivite ve izleyici testi gibi pilot testler yapılmalı ve elde edilen sonuçlara göre tasarım yapılmalıdır. Gerek pilot testler sırasında ve gerekse de saha uygulaması sırasında sahadaki üretim ve gözlem kuyuları kimyasal ve ısı gözlem noktaları olarak kullanılmalıdır. Tekrar-basma uygulamaları, uygun tasarlanmaları durumunda, enjekte edilen suyun ve rezervuardaki suyun kimyasal bileşimlerdeki farklılıklar (örneğin sular içinde çözünmüş karbondioksit oranlarındaki farklılıklar) nedeniyle bir izleyici (tracer) testi gibi değerlendirilebilir ve işlemin etkinliği hakkında bilgi alınabilir.

Tekrar-basma uygulaması; jeotermal sahaların uygun ve sürdürülebilir işletilmesinin olmazsa olmaz koşullarından birisidir, jeotermal sahaların sürdürülebilir işletilmesi için zorunlu, doğanın korunması için gerekli, rezervuardan daha fazla enerji üretimini sağladığı için ekonomik özellikli bir işlemdir.

Anahtar Kelimeler: Tekrar-basma, Türkiye'deki Uygulamalar, Gözlemler.

ABSTRACT

The energy recovered from the fluids produced from geothermal systems can be used for different purposes; electric generation, space heating, etc. All these uses generate an excess of spent hot liquid which must be discarded. Particularly liquid-dominated geothermal fields such as the ones discovered in Turkey have large volumes of waste liquid. After utilization, cooled water must be handled. Disposal of the heat-depleted water often is a problem, because of temperature, volume and chemical constituents. One solution is reinjecting the water back into the porous formations.

The term “reinjection” is in wide usage in the geothermal industry for any sort of injection. This term appears to have originated from the concept of cycling fluid through a geothermal system. Thus “reinjection” is used to describe a process wherein fluid is injected in cyclic mode.

Reinjection is necessary for optimizing the exploitation of a geothermal field. Not only does this present a way to solve the problem of disposal of cooled geothermal brine with contaminants, but it also serves the following useful purposes: (1) Thermal energy extraction – The native fluids produced from most geothermal systems recover only a fraction of the total energy within the system. The most apparent method of recovering additional heat from the system is to inject cold water into the reservoir to extract heat from the reservoir rock. (2) Maintain reservoir pressure – Natural liquid recharge tends to compensate for the removal of water from a reservoir during production. However, natural recharge rarely replaces the large mass of fluid produced. (3) Reinjection also may affect ground subsidence in a production area and it may trigger seismic activity in some cases.

For a given production field, it is important that both the location and flow rates of the injection wells be selected properly. The locations of the injection wells should be chosen so that cold injected liquid will not mix directly with hot liquid in producing wells. Channelling and early breakthrough of cold liquid should be avoided. Therefore, a safe distance between the reinjection and production wells and zones should be established with confidence.

Reinjection creates a zone of injected water near the injection well. This zone is at a lower temperature from that of the original aquifer. The cold zone grows with time and eventually reaches the production wells. During the passage of the injected liquid toward the production wells, the water will be heated by contact with the rock and a volume of the rock will be cooled. Thus the apparent cooled zone moves with a lower velocity than the injected fluid.

The breakthrough of cold injected water at a production well causes the produced water temperature to decrease. It is thus important to forecast the temperature at the production wells as a function of time, and other parameters such as cumulative injection, well spacing, etc. For a given geothermal field, it is essential that the useful heat recovery be maximized.

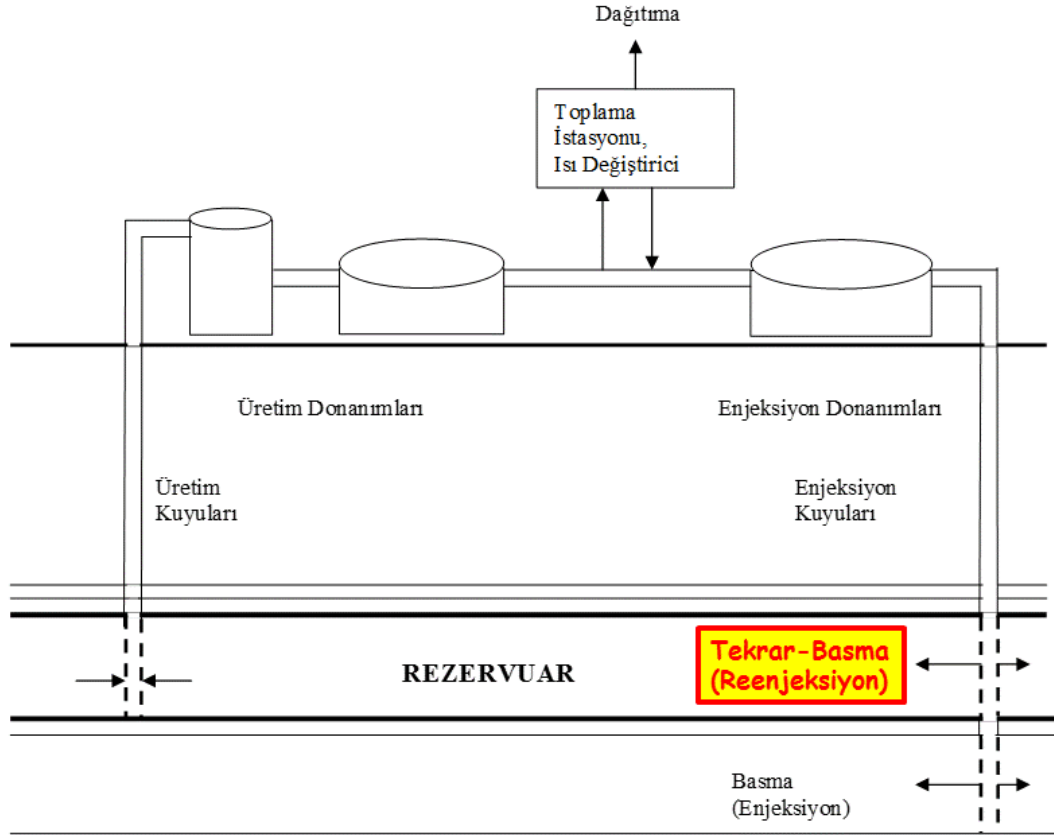
In the paper, heat transfer models dealing with water injection into a porous medium are discussed, and models considering the heat transfer are described. Then the field applications in geothermal reservoirs in Turkey are presented.

Key Words: Reinjection, Field Applications in Turkey, Observations.

1. GİRİŞ

Jeotermal rezervuarlar içinde akışkan akışı incelenirken dikkate alınması gereken en önemli özelliklerden birisi gözenekli ortamda akış sırasında sıcaklığın ve basıncın değişiyor olmasıdır. Rezervuara tekrar-basma işlemi sırasında oluşan akış izotermal (eşsıcaklık)-olmayan akıştır. Basılan su formasyonda ilerlerken sıcak kayaktan ısı alarak ısınır ve daha sonra üretim kuyularına varıp üretilebilir. Bu işlem rezervuarın işletilmesi sırasında tekrarlanan bir işlemdir. Üretilen artık su rezervuara basılır, basılan su rezervuarda ilerlerken ısınır, ısınan su tekrar üretilir, vb. Dolayısıyla bu

tür bir basma işlemi tekrarlanan bir işlemdir ve tekrar-basma işlemi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1'de tekrar-basma uygulamalı jeotermal kaynak sistem şeması gösterilmektedir.



Şekil 1. Jeotermal Enerji Kaynağı Sistem Şeması.

Suyun etken olduğu bir rezervuar sistemi için, suyun toplam ısı içeriği suyun yoğunluğuna ve ısı kapasitesine, rezervuarın toplam ısı içeriği ise su ve rezervuar kayacının yoğunluğuna ve ısı kapasitesine bağlıdır. Rezervuarın içerdiği suyun ısısının toplam rezervuar ısısına oranı,

$$\frac{\text{Suyun Isısı}}{\text{Rezervuar Isısı}} = \frac{\rho_w C_w \phi}{\rho_w C_w \phi + \rho_m C_m (1 - \phi)} \quad (1)$$

olarak verilebilir. Kayaç (matriks) yoğunluğu için $\rho_m = 2.65 \rho_w$ ve kayaç ısı kapasitesi için $C_m = C_w / 4$ yaklaşık ilişkileri varsayılırsa, Denklem 1:

$$\frac{\text{Suyun Isısı}}{\text{Rezervuar Isısı}} = \frac{\phi}{\phi + 0.66(1 - \phi)} \quad (2)$$

şeklinde basitleştirilebilir.

Sıvıyla dolu bir jeotermal sisteme soğuk su basılması durumunda Denklem 1 rezervuarda soğuk su cephesinin hareketini tanımlamakta da önem kazanmaktadır. Basılan su cephesi (kimyasal veya hidrolik cephe) rezervuarda belirli bir uzaklığa ulaştığında, soğuk su cephesi (sıcaklık cephesi veya ısı cephe) daha küçük bir uzaklığa ulaşmış olacaktır ve iki farklı cepheye olan uzaklık oranı Denklem 2 ile tahmin edilebilir.

$$\frac{v_T}{v_H} = \frac{\phi}{\phi + 0.66(1 - \phi)} = \frac{t_H}{t_T} \quad (3)$$

Burada, v_T ısı cephnen hızını, v_H hidrolik cephnen hızını, t_T ısı cephnen belirli bir uzaklığa varış zamanını ve t_H ise hidrolik cephnen uzaklığa varış zamanını temsil etmektedir.

Basılan artık akışkanın gözenekli ortamda akışı dikkatle incelenmesi gereken önemli konulardan birisidir. Gözenekli ortam homojen, doğal çatlaklı, bir tek düşey veya yatay çatlaklı olabilir. Akış doğrusal, çevrel veya yarı küresel olarak gelişebileceği gibi laminar veya türbülans olabilir. Akışkan tek veya iki fazlı olarak akabilir. Kaynak [1] - [14] bu konularda yapılmış bazı çalışmaları tartışmaktadır.

2. TEKRAR-BASMA

Jeotermal sahanın işletilmesinde, üretim ve tekrar-basmanın birlikte düşünülmesi, planlanması, tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Sahadaki üretim ve tekrar-basma uygulamasının incelenerek, uygulamaların teknik ve ekonomik başarısı hakkında kesin yargılara varabilmek için üretim ve tekrar-basma verilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Sahanın geliştirilme aşamasında olması durumunda veya gerekli verilerin yetersizliği nedeniyle teknik ve ekonomik başarı hakkında kesin yargılara varmak mümkün olmayabilir.

2.1. Tekrar-Basmanın Yararları

Jeotermal rezervuarlardan üretilen akışkanların enerjisi farklı amaçlarla kullanılmaktadır; elektrik üretimi, yerleşim alanlarının ısıtılması, endüstriyel amaçlı, seraların ısıtılması, v.b. Üretilen akışkanın enerjisinden yararlandıktan sonra kalan atık veya artık suyun ya yararlı alanlarda kullanılması veya çevreye zarar vermeden ortadan kaldırılması gerekmektedir. Atık veya artık suyun değerlendirilmesi uygulamada ve saha işletiminde önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sorun için en uygun çözüm kullanılmayan sıcak suyun rezervuara tekrar basılmasıdır. Söz konusu işlem tekrar-basma veya reenjeksiyon olarak tanımlanmaktadır.

Jeotermal rezervuara tekrar-basma işleminin aşağıda sıralanmakta olan çok yönlü yararları vardır [6]:

1. Kullanılmayan sıcak suyun çevreyi kirletmesi önlenecektir.
2. Üretilen su rezervuara tekrar basıldığından dolayı rezervuarın su dengesi bozulmayacak, rezervuarın basıncı korunmuş olacaktır. Her ne kadar üretilen suyun bir bölümü doğal beslenme yoluyla karşılanabilirse de, genellikle doğal beslenme yoluyla rezervuara giren miktar üretilen miktar kadar olmayacaktır. Böylece doğal beslenme için gereksinim azalmış olacaktır.
3. Jeotermal rezervuarlardan üretilen orijinal akışkanla elde edilen enerji üretimi, rezervuarın yerinde enerjisi göz önüne alındığında, çok düşük bir düzeyde olacaktır. Denklem 2'den anlaşılabileceği gibi, söz konusu oran, gözenekliliğe bağlı olarak, % 5-10 kadardır ve akışkanın içerdiği enerjinin toplam rezervuar enerjisine oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla rezervuardan ek enerji üretimi için en uygun çözüm rezervuara göre daha soğuk olan kullanılmayan suyun rezervuara basılması olacaktır. Tekrar-basma işleminin uygulanmasıyla rezervuarın üretim dönemi uzar.
4. Üretimden dolayı rezervuar hacmindeki azalmanın sonucunda oluşan yeryüzü çökmeleri en aza indirgenmiş olur.
- 5.

2.2. Tekrar-Basmanın Tasarımı

Tekrar-basmanın tasarımı ve uygulanması sırasında dikkatle incelenmesi ve gözlemlenmesi gerekli faktörler de aşağıda sıralanmaktadır:

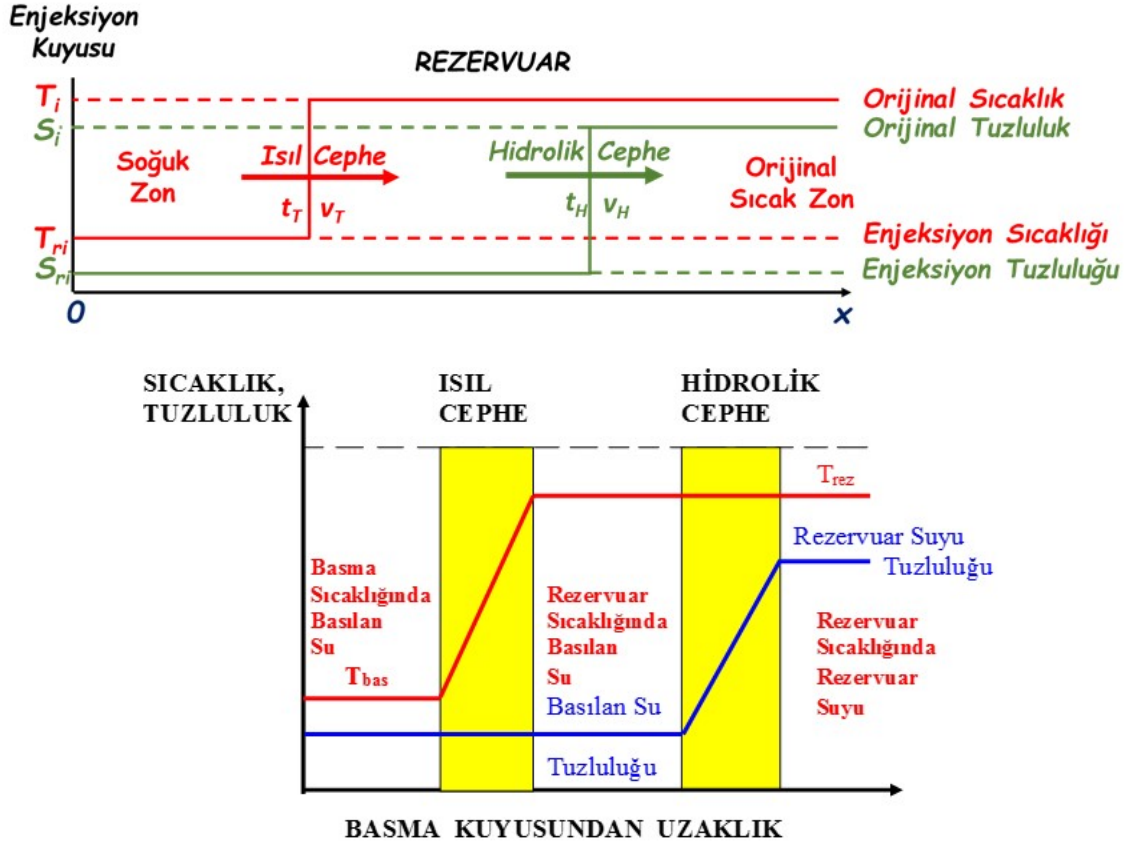
- a. Suyun basıldığı bölgedeki hidrolojik koşullar iyi belirlenmelidir. Basılan suyun doğrudan jeotermal rezervuara gitmeyip te çevreye yayılması ve kirlenme sorunları doğurması gözardı edilmemelidir. Özellikle çevredeki içilebilir veya kullanılabilir su kaynaklarına zarar verilmemesi gerekmektedir. Bu konunun incelenmesi için tekrar-basma uygulaması başlamadan önce bir izleyici testi (tracer test) yapılması önerilir. Basılan su ile orijinal rezervuar suyu arasındaki kimyasal bileşim farkı gözlenmelidir. Bu amaçla, bölgedeki su kuyuları ve varsa yeryüzüne ulaşmakta olan su kaynakları gözlem noktaları olarak ve sistematik olarak analiz edilebilir.

- b. Yüzey donanımlarında, enjeksiyon kuyusunda ve suyun basıldığı formasyonda oluşabilecek mineral çökmesi önemli sorunlar yaratabilir [11]. Olası çökme sorununu ve su içinde askıda katı maddelerin formasyonu kirletme sorununu en aza indireyecek tasarımlar yapılması önemlidir.
- c. Basılan suyun kimyasal bileşimi rezervuardaki orijinal suyun bileşiminden farklı olması durumunda, bileşimlerdeki farklılıktan dolayı oluşan kimyasal cephe, ki bu cephe hidrolik cephe olarak ta tanımlanmaktadır, sıcaklık cephesinden (veya ısıl cepheden) daha hızlı hareket edecektir [10]. Şekil 1 ısıl cephenin ve hidrolik cephenin rezervuarda ilerlemesini şematik olarak göstermektedir. Isıl cephenin hızı ile hidrolik cephenin hızı arasındaki ilişki Denklem 3'te verilmektedir. Üretim kuyularında herhangi bir sıcaklık değişmesi oluşmadan önce üretilen su bileşiminde basılan su ile orijinal rezervuar sularının karışmasından dolayı oluşan bileşim değişimi gözlenmelidir. Bu gözlem sahada tekrar-basma uygulamasının tasarımında incelenmesi gerekli ve önemli bir faktördür.
- d. Isıl cephenin üretilen suyu etkileyip etkilemediğinin belirlenebilmesi için kolaylıkla başvuru olan yöntem, enjeksiyon kuyusunun yakınındaki üretim kuyularından üretilen suyun sıcaklığının ölçülmesidir. Basılan suyun ve üretilen suyun sıcaklıkları periyodik olarak ölçülmeli ve kaydedilmelidir.
- e. Tekrar-basma uygulaması sırasında basılan formasyonda yeraltı hareketleri olabilir. Dolayısıyla uygulama boyunca belirli dönemlerde sismik çalışmaların (veya mikrosismik çalışmaların) yapılmasında yarar vardır.
- f. Enjeksiyon kuyularının maliyeti ile birlikte pompa ve pompaları çalıştırmak için gerekli gücün tekrar-basma uygulaması ekonomisinin değerlendirilmesinde önemli faktörler olduğu unutulmamalıdır.

Tekrar-basma olayında yanıtlandırılması gerekli en önemli sorulardan birkaçı arasında: suyun basılması için kaç kuyu kullanılacağı, pompa gerekip-gerekmiyeceği ve suyun nereye basılacağı sayılabilir. Basılan suyun debisi biliniyorsa, ısıl kirlenmeyi önlemek için rezervuarınıkinden daha düşük sıcaklıktaki suyun üretim bölgesinden ne kadar uzakta bir kuyudan veya kuyulardan basılması gerektiği tekrar-basma uygulanmasında incelenmesi gerekli en önemli konu olmaktadır.

Enjeksiyon kuyularının yerleri seçilirken özellikle basılan soğuk suyun üretilen sıcak rezervuar suyunu hemen etkilememesi istenir. Basılan suyun yüksek geçirgenlikli akış kanalları içinde akışı ve üretim kuyularına erken varışı önlenmelidir. Genellikle çatlaklı kayalar içerisinde akışın enjeksiyon kuyusunun etrafında simetrik ilerlemesi beklenmez. Akışkanın bazı yönlerde daha hızlı ilerleyeceği gözönüne alınmalıdır. Dolayısıyla enjeksiyon ve üretim kuyuları arasında güvenilir bir aralığın olması gerekmektedir. Bu aralıklar, ancak sağlıklı basınç girişim ve özellikle de izleyici testleri ile rezervuardaki akış yollarının tanımlanmasından sonra belirlenebilmektedir.

Tekrar-basma sırasında enjeksiyon kuyusu etrafında basılan suyun oluşturduğu bir zon bulunur. Şekil 1'de gösterildiği gibi, enjeksiyon kuyusu etrafındaki zonun sıcaklığı orijinal rezervuar sıcaklığından daha düşük olacaktır. Bu düşük sıcaklıklı zon zamanla büyür ve sonuçta üretim kuyusuna varır. Basılan suyun bu hareketi sırasında, kayalarla temas eden su ısınırken kayalar ise soğuyacaktır. Düşük sıcaklık zonunun formasyonda ilerleme hızı basılan suyun hidrolik ilerleme hızından doğal olarak daha düşük olacaktır. Basılan soğuk suyun üretim kuyularına varışından belirli bir süre geçtikten sonra üretilen su sıcaklığı düşer. Dolayısıyla üretim kuyularındaki suyun sıcaklığının basılan su debisine, zamana ve enjeksiyon ile üretim kuyuları arasındaki aralığa bağlı olarak tahmini önemli olmaktadır.



Şekil 1– Tekrar-basma işleminde hidrolik cephe ve ısı cephenin rezervuar içinde ilerlemesi.

3. ENJEKSİYON İŞLEMİNDE KUYULARIN ÖNEMİ

Bir jeotermal sahada herhangi bir kuyunun enjeksiyon kuyusu olarak kullanılması durumunda kuyuya ait üç önemli özelliğin değerlendirilmesi gerekmektedir:

- 1) Kuyu başı ve kuyu içi donanımının enjeksiyona uygunluğu,
- 2) İstenen enjeksiyon debisini sürekli olarak sağlayabilme özelliği,
- 3) Kuyunun saha içinde ve üretim sahasına göre konumu.

Aşağıda bu üç özellik ayrıntılı olarak incelenmektedir.

3.1. Kuyu Başı ve Kuyu İçi Donanımının Enjeksiyona Uygunluğu

Üretim kuyuları enjeksiyon kuyularına dönüştürülebilir. Ancak bu dönüştürme işlemi kuyunun incelenmesi, tasarlanması ve hazırlanması aşamalarını gerektirmektedir. Kuyunun enjeksiyon işlemi için teknik ve ekonomik uygunluğu kesinlikle araştırılmalıdır.

Kuyunun enjeksiyon kuyusu olarak kullanılması durumunda incelenecek ilk işlem kuyubaşının enjeksiyona uygunluğu olmalıdır. Kuyubaşı donanımı enjeksiyonda gerekli olabilecek yüksek basınca dayanıklı olmalıdır.

Diğer taraftan kuyu içindeki koruma borusunun durumu önemlidir. Eğer kaçak yapan yerler veya herhangi bir mekanik bozulma söz konusu ise araştırılmalı ve gerekli onarım ve önlemler alınmalıdır. Aynı şekilde kuyu dibinde delikli boru (liner) varsa incelenmeli ve gerekirse temizlenmelidir.

Gerekmesi durumunda kuyunun yeniden delinerek derinleştirilmesi veya mekanik koşulların iyileştirilmesi gündeme gelebilir. Kum veya kayaç parçacıklarının döküntüsünün kuyunun dibini doldurması durumunda bir sondaj makinasıyla kuyuda temizlik yapılması gerekli olabilir.

Kuyudibinin basılan akışkanın seçilen derinliklere gidişini sağlayacak yapıda olması arzu edilir. Basılacak derinliklerin önceden belirlenmesi durumunda, kuyu tamamlama işleri uygun olarak tasarlanabilir.

Gerektiğinde asitleme, perforasyon ve hidrolik çatlatma işlemleri tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.

3.2. İstenen Enjeksiyon Debisini Sürekli Olarak Sağlayabilme Özelliği

Üretilebilirliği düşük olan kuyuların enjeksiyon kuyusuna dönüştürülmesi ilk akla gelen yaklaşımlardan birisidir. Ancak unutulmaması gereken önemli bir özellik ise, düşük üretilebilirliğin formasyonun olası düşük geçirgenliğinden ve düşük net kalınlıktan kaynaklanabileceği ve dolayısıyla bu parametrelerin aynı zamanda enjektiviteyi de aynı şekilde olumsuz olarak etkileyeceğidir.

Enjeksiyon durumunda kontrol edilmesi gereken iki önemli parametre enjeksiyon debisi ve gerekli kuyubaşı enjeksiyon basıncıdır.

Rezervuar koşullarına göre enjeksiyon debisi zamanla artabilir, azalabilir veya sabit kalabilir. Debi zamanla azalıyorsa sahanın kapalı bir sistem olarak davranış gösterdiği veya basılan akışkanın kuyu yakın civarındaki formasyonu kirleterek geçirgenliği düşürdüğü yorumları yapılabilir. Debi zamanla artıyorsa enjeksiyon koşullarının kuyu yakın civarındaki formasyon geçirgenliğini olumlu olarak etkilediği, örneğin rezervuara sıcaklığı düşük akışkanın enjeksiyonunda oluşan geçirgenlik artışı gibi, yorumu yapılabilir. Ayrıca enjeksiyon debisinin, enjeksiyon kuyusuna yakın bölgedeki üretim kuyularının üretimlerinden etkilenebileceği gerçeği ihmal edilmemelidir.

İstenen enjeksiyon debisinin gerçekleştirilebilmesi için kuyunun saha içinde debi için gerekli uygun geçirgenliğe sahip bölgelere yerleştirilmiş olması önemlidir.

3.3. Enjeksiyon Kuyusunun Saha İçinde ve Üretim Sahasına Göre Konumu

Enjeksiyon kuyusunun yerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli özellik basılan akışkanın sahanın üretim performansına etkisidir. Enjeksiyon sırasında; rezervuarda akışkan varlığının artırılması, basılan akışkanın akış sırasında sıcaklığının artması ve zamanla üretim kuyularından üretilmesi ile sahadan ısı üretiminin artırılması amaçlanır. Ancak sakınılması gereken olay ise basılan sıcaklığı düşük akışkanın yeteri kadar ısınmadan ve sıcaklığı istenilen düzeye çıkmadan üretim kuyusuna varması, dolayısıyla üretim performansının olumsuz etkilenmesidir.

Jeotermal sahalarda tekrar-basma uygulamalarında genel yaklaşım:

- a) enjeksiyon kuyularının üretim sahasını çevreleyen konumda yerleştirilmesi,
- b) olduğunca üretim zonundan daha derin formasyona enjekte edilerek, akışkanın akış sırasında ısıdıktan sonra oluşan yoğunluk düşümü neticesinde yukarılara hareket ederek üretim kuyularına varması,
- c) enjekte edilen soğuk akışkanın rezervuar içinde ısıdıktan sonra üretim kuyularına varışını sağlayacak yeterli uzaklıkta enjeksiyon kuyularının yerleştirilmesi,

konularını hedefleyecek şekilde düzenlenir.

Enjeksiyon kuyularının yerlerinin seçiminde belirli bir sistematik yerleşim programı uygulanmalı, kuyuların gelişigüzel yerleştirilmesinden sakınılmalıdır. Kuyunun mümkün olduğunca üretim sahasının dışında tutulması doğru bir yaklaşımdır. Enjeksiyon kuyusu ile yakınındaki üretim kuyuları arasında bir akış kanalı oluşturabilecek çatlak veya kırık yapının olmamasına dikkat edilmelidir. Bu tür bir akış kanalı basılan soğuk akışkanın hızla üretim kuyusuna varmasına neden olabilir ve ısı üretimi olumsuz etkilenir.

Tekrar-basma planlamasında en önemli parametrelerden birisi de kuyu sayısıdır. Enjeksiyonun mümkün olduğunca çok sayıda kuyudan yapılmasında yarar vardır. Enjeksiyon debisi küçük tutularak, basılan soğuk akışkanın rezervuarda daha çabuk ısınması sağlanırken, formasyonda ısı kirlenmeden kaynaklanan olası olumsuz etkiler minimum düzeyde tutulabilir. Doğal olarak, enjeksiyonda kullanılan kuyu sayısı arttıkça maliyette yükselecektir. Dolayısıyla, basılacak toplam miktar, kuyu sayısı ve maliyet arasında bir optimizasyona gitmek en akılcı yaklaşım olmaktadır.

4. TEKRAR-BASMANIN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bu bölümde akışın ve rezervuarın türüne bağlı olarak tekrar-basma uygulamasında rezervuarda oluşan sıcaklık dağılımını veren matematiksel modeller kısaca tanıtılacaktır.

4.1. Çevrel Akışta Rezervuar İçinde Sıcaklık Dağılımı

Orijinal sıcaklığı T_i olan bir rezervuara T_{ri} sıcaklığında bir akışkan basıldığını düşünelim. Akış yönünde ısının taşıma yoluyla gerçekleştiği ve rezervuardan alt ve üst formasyonlara ısı geçişinin iletim yoluyla olduğu varsayılırsa, rezervuar içinde sıcaklık dağılımı

$$T_D = \operatorname{erfc}\left(\frac{r_D}{2\sqrt{\theta(t_D - r_D)}}\right) \quad t_D \geq r_D \text{ için} \quad (4)$$

olarak verilir. Burada boyutsuz parametreler

$$T_D = \frac{T - T_i}{T_{ri} - T_i}, \text{ boyutsuz sıcaklık}$$

$$\theta = \frac{\rho_{av} C_{av}}{\rho_2 C_2}, \text{ boyutsuz hacimsel ısı kapasitesi}$$

$$r_D = \frac{2k\pi r^2}{\rho_w C_w q_{ri} b}, \text{ boyutsuz yarıçap}$$

$$t_D = \frac{kt}{\rho_{av} C_{av} b^2}, \text{ boyutsuz zaman}$$

olarak tanımlanmaktadır. Eğer rezervuar ile alt ve üst formasyonlar arasında ısı geçişi ihmal edilirse, ısıl cephenin r uzaklığına varış zamanı

$$t_{BT} = \frac{\pi^2 h \rho_{av} C_{av}}{\rho_w C_w q_{ri}} \quad (5)$$

denklemleriyle bulunur. Burada $\rho_{av} C_{av}$ jeotermal rezervuar için hacimsel ısı kapasitesi olup

$$\rho_{av} C_{av} = (1 - \phi) \rho_m C_m + \phi \rho_w C_w \quad (6)$$

olarak verilir. $\rho_2 C_2$ ise alt ve üst formasyonların hacimsel ısı kapasitesidir.

Denklem 4'teki $\operatorname{erfc}(x)$, x 'in tamamlayıcı hata fonksiyonu (complementary error function) olarak bilinir. Denklem 4-6'da geçen diğer tanımlar:

k = rezervuardan alt ve üst formasyonlara ısı iletimi için geçerli ısıl iletkenlik, J/m.s.°C

ρ_w = su yoğunluğu, kg/m³

C_w = suyun ısı kapasitesi, J/kg.°C

ρ_m = rezervuar kayacı (matris) yoğunluğu, kg/m³

C_m = rezervuar kayacı ısı kapasitesi, J/kg.°C

ϕ = gözeneklilik

t = enjeksiyon zamanı, s

q_{ri} = enjeksiyon debisi, m³/s

$h = 2b$ = rezervuar kalınlığı, m

T = rezervuar içinde enjeksiyon kuyusundan r uzaklıkta ve t zamanındaki sıcaklık, °C.

Şekil 2’de görüldüğü gibi tekrar-basma sırasında enjeksiyon kuyusu etrafında basılan suyun oluşturduğu bir zon bulunur. Bu zonun sıcaklığı orijinal rezervuar sıcaklığından daha düşük olacaktır. Bu düşük sıcaklıklı zon zamanla büyür ve sonuçta üretim kuyularına varır. Basılan suyun bu hareketi sırasında, kayaçla temas eden su ısınırken kayaç ise soğuyacaktır. Düşük sıcaklık zonunun rezervuarda ilerleme hızı basılan suyun hidrolik ilerleme hızından doğal olarak daha düşük olacaktır.

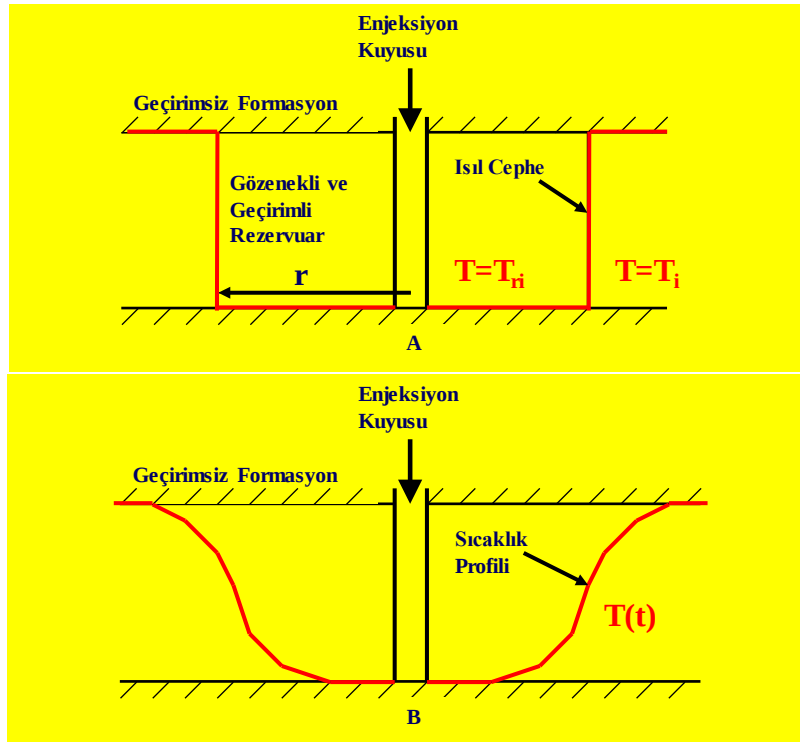
4.2. Kuyuçifti İçin Rezervuarda Sıcaklık Dağılımı

Denklem 4 ve 5, enjeksiyon kuyusu etrafında üretim yapan bir kuyu olmaması durumunda geçerlidir. Eğer, enjeksiyon kuyusu yakınında bir üretim kuyusu varsa, iki kuyu birlikte bir kuyu çifti (doublet) (Şekil 3) davranışı gösterir. Kuyuçifti davranışında, ısıl cephenin üretim kuyusuna varış zamanı

$$t_{BT} = \frac{r^2 h \rho_{av} C_{av}}{\rho_w C_w q_{ri}} \quad (7)$$

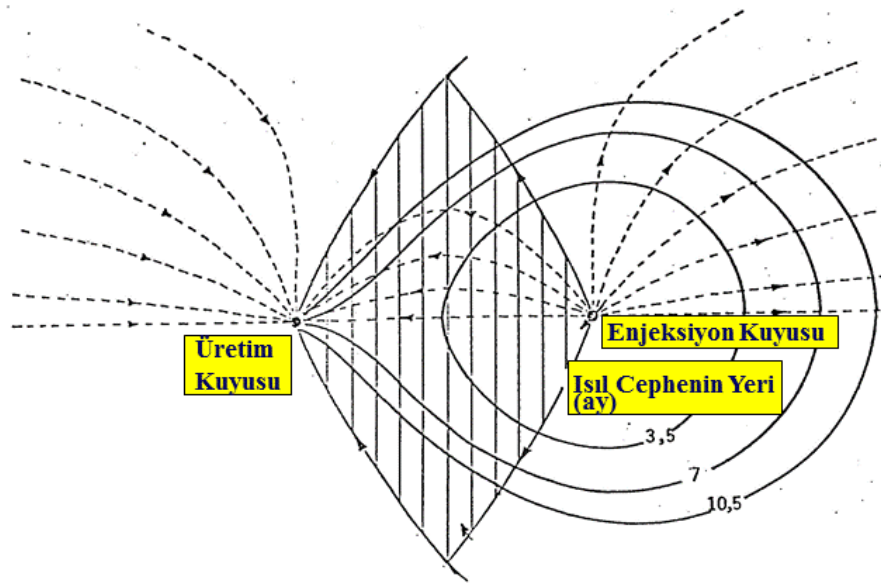
denklemleriyle verilir. Denklem 7 ısıl kirlenmenin oluşmayacağı koşulları (veya güvenilir aralığı) belirlemek üzere tekrar-basma tasarımında kullanılabilir.

Basılan soğuk suyun üretim kuyularına varışından belirli bir süre geçtikten sonra üretilen su sıcaklığı düşer. Dolayısıyla üretim kuyularındaki suyun sıcaklığının basılan su debisine, zamana ve enjeksiyon ile üretim kuyuları arasındaki aralığa bağlı olarak tahmini önemli olmaktadır.



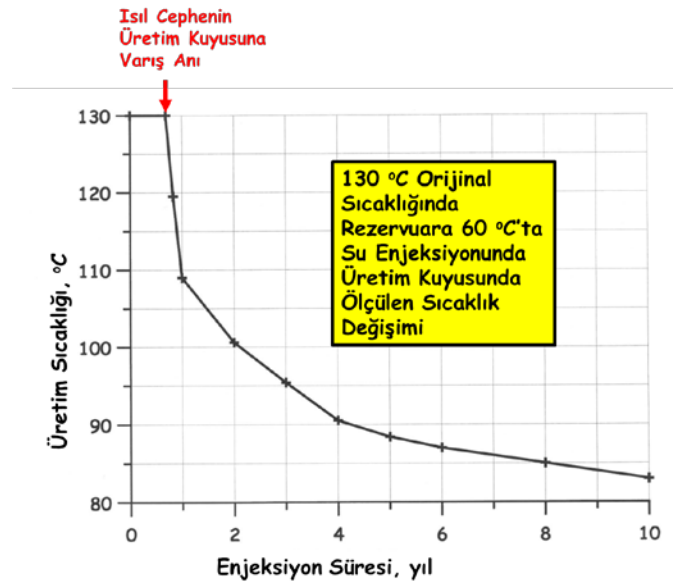
Şekil 2. Başlangıç sıcaklığı T_i olan gözenekli ortama T_r sıcaklığında çevrel akışta su basılmasında oluşan sıcaklık dağılımı:

- A- Alt ve üstteki geçirimsiz formasyonlara ısı geçişi olmaması durumu
- B- Alt ve üstteki geçirimsiz formasyonlara ısı geçişi olması durumu.



Şekil 3 . Kuyuçifti modeli için kesik çizgiler akış çizgilerini gösterirken, kesiksiz çizgiler 3.5, 7 ve 10.5 ay enjeksiyon sonunda ısı cephesini göstermektedir.

Şekil 4 tekrar-basma uygulamasında üretim sıcaklığının değişimini göstermektedir. Burada 130 °C orijinal sıcaklığındaki rezervuara 60 °C'ta su enjeksiyonunda üretim kuyusunda ölçülen sıcaklık değişimi şematik olarak gösterilmektedir. Isıl cephenin üretim kuyusuna varış anından önce üretim sıcaklığı orijinal rezervuar sıcaklığı iken cephenin varışından sonra üretim sıcaklığında düşüş gerçekleşir.



Şekil 4. Tekrar-basma uygulamasında üretim sıcaklığının değişimi.

Kuyuçifti modelinde rezervuar içinde sıcaklık dağılımını bulmak için çözümü Şekil 5'te verilen Gringarten-Sauty (1975) modeli kullanılabilir.

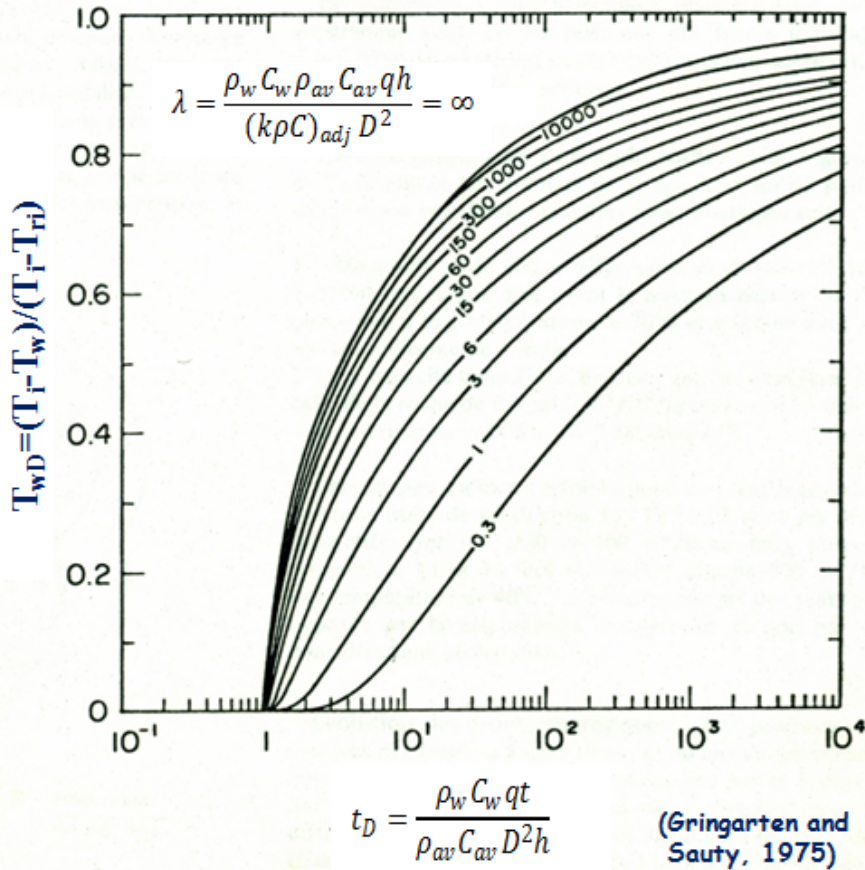
4.3. Doğal Çatlaklı Rezervuarda Sıcaklık Dağılımı

Doğal çatlaklı ortamda akış Şekil 6'da şematik olarak gösterilmektedir. Doğal çatlaklı rezervuarlarda izotermal olmayan akışkan akışı için modeller (Bodvarsson ve Tsang, 1981) [5] ve Satman (1988) [8] tarafından verilmektedir. Şekil 7'de ise farklı enjeksiyon zamanlarında çatlak ve matriks içinde sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, enjeksiyon kuyusu etrafında enjeksiyon suyu sıcaklığında bir soğuk zon oluşur. Bu zonun önünde bir geçiş zonu yer alır. Daha da ileride ise orijinal rezervuar sıcaklığında bir sıcak su zonu vardır. Enjeksiyon kuyusundan geçiş zonuna kadar olan bölgede çatlak içinde ısı taşınımı gerçekleşir. Geçiş zonu içinde ise, kayaç matriksinden çatlakla doğru akış ısı iletimi ile olur.

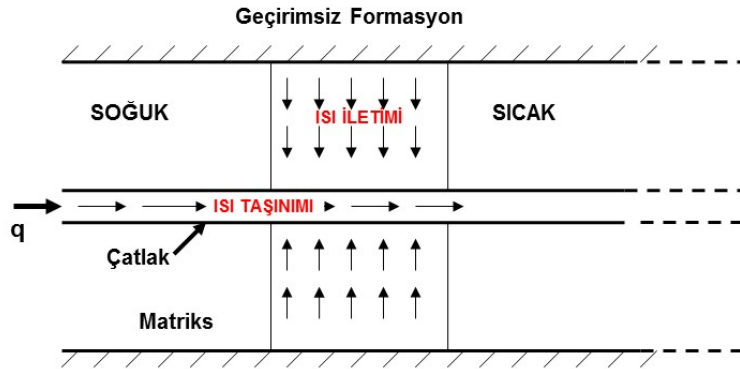
Şekil 7'de 0.1-0.9 boyutsuz sıcaklık (T_D) konturları gösterilmektedir. $T_D=1.0$ enjekte edilen suyun sıcaklığını temsil ederken, orijinal rezervuar suyunun sıcaklığı ise $T_D=0.0$ olarak alınmaktadır. Çatlak $\eta=0$ değerinde (yatay eksen üzerinde) bulunmaktadır.

Matriksin etkisinin henüz hissedilmediği küçük enjeksiyon zamanı değerlerinde ($\tau=0.01$), çatlak içinde ısı cephe hızla hareket etmektedir. Ara zaman değerinde ($\tau=0.1$), matriksle çatlak arasında ısı alışverişi başlamaktadır, sıcaklık konturları matriks içine doğru yayılmaktadır. Büyük zaman değerinde ($\tau=1$) tüm sistem (çatlak+matriks) içinde ısı cephe oluşmakta ve bir düz doğru şeklinde enjeksiyon kuyusundan üretim kuyusuna doğru hareket etmektedir.

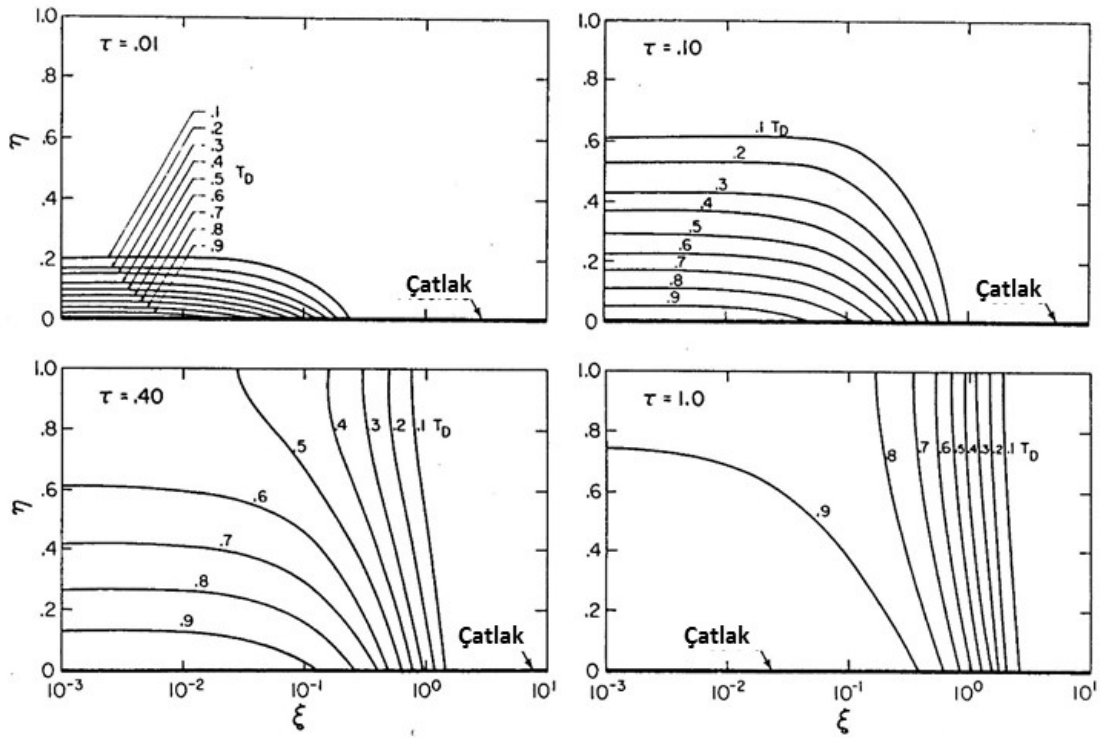


$T_w = t$ enjeksiyon zamanında ve enjeksiyon kuyusundan D uzaklığında suyun sıcaklığı, °C
 k_{adj} = Alt ve üst formasyonların ısı iletkenliği, J/m³.°C
 q = Enjeksiyon debisi, m³/st
 $(\rho C)_{adj}$ = Alt ve üstteki formasyonların hacimsel ısı kapasitesi, J/m³.°C

Şekil 5. Kuyuçifti modelinde rezervuar içinde sıcaklık dağılımını bulmakta kullanılan Gringarten-Sauty (1975) [3] grafiği.



Şekil 6 . Bir çatlığa soğuk su enjeksiyonu durumunda enjeksiyon kuyusu etrafında enjeksiyon sıcaklığında soğuk zon, geçiş zonu ve uzakta orijinal rezervuar sıcaklığında sıcak zonun şematik görünümü.



Şekil 7. Çatlaklı bir rezervuarda farklı enjeksiyon zamanlarında sistem içinde sıcaklık dağılımları [5].

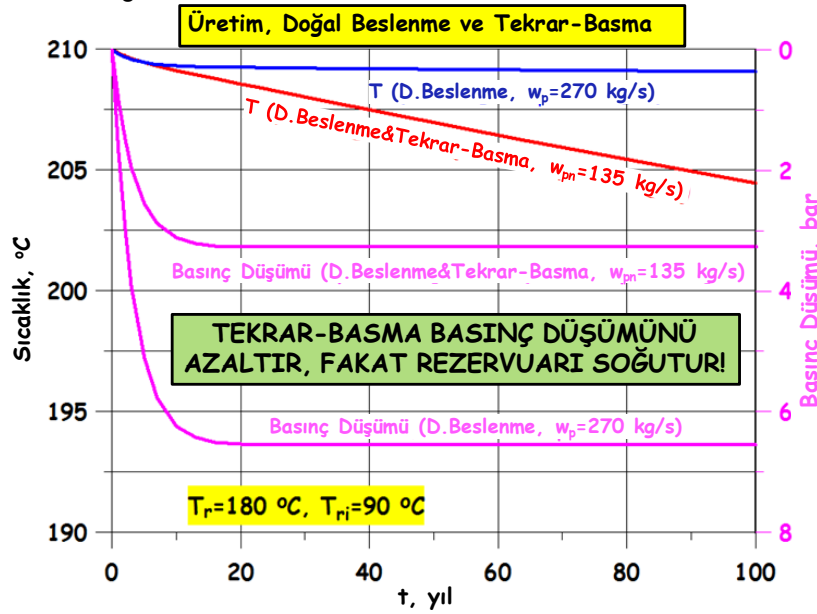
Tekrar-basma uygulamasında rezervuar basıncının korunması amaçlanır ve sağlanırken, görece olarak soğuk suyun enjeksiyonundan dolayı rezervuarda soğuma oluşur. Doğal beslenmenin olduğu varsayılan bir rezervuarda tekrar-basmanın olması ve olmaması durumları için bir rezervuarda basınç ve sıcaklığın değişimi şematik olarak Şekil 8’de gösterilmektedir [13].

Şekil 8’de 210 °C orijinal sıcaklığı olan rezervuara 180 °C sıcaklığında doğal beslenme girişi olurken 90 °C sıcaklığında suyun tekrar-basılması modellenmekte, oluşan rezervuar basınç ve sıcaklık değişimleri, sadece doğal beslenmenin olduğu ve tekrar-basma yapılmayan durum ve doğal beslenme ile tekrar-basmanın uygulandığı durum için karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tekrar-basma uygulamasında basınç düşümünün azaldığı ve fakat rezervuarda soğumanın olduğu açık olarak görülmektedir.

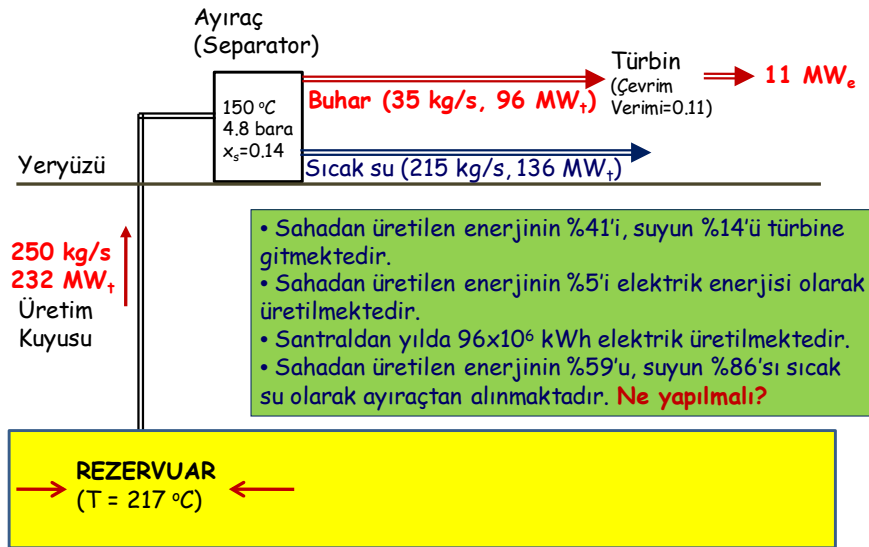
4.4 Üretimde Enerji ve Akışkan Dengeleri ve Tekrar-Basmanın Yararı

Doğal beslenmenin yeterli olmaması durumunda, üretim nedeniyle rezervuarın basıncında düşüş beklenir. Bu düşüş tekrar-basma işleminin uygulanmasıyla etkili bir şekilde önlenir, ayrıca rezervuar kayacının daha fazla ısısının üretilmesi ve dolayısıyla rezervuardan yapılan toplam enerji üretiminin artması sağlanır. Bu yararlı etkiyi basitçe görebilmek için bir örnek jeotermal rezervuarı alarak, bu sahada tekrar-basma uygulanması ve uygulanmaması durumunda oluşabilecek enerji dengelerini inceleyelim.

Örnek jeotermal rezervuarı için rezervuardan 217 °C sıcaklıkta 250 kg/s debide ve 232 MW_t akışkan üretildiği varsayılmaktadır. Çevrim verimi 0.11 olan 11 MWe güçte türbine ayrıraftan 35 kg/s debide 96 MW_t ısıl debide su buharı alınmaktadır. Şekil 9 incelenen örnek üretim durumu için enerji ve akışkan dengelerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 8. Tekrar-basma uygulamasında basınç düşümünde azalma ve rezervuarda soğuma oluşumunun şematik görünümü [13].



Şekil 9. 11 MWe elektrik santrali için tekrar-basma uygulanırsa ve uygulanmayıp da artık su yüzeyde harcanırsa rezervuarda enerji dengeleri.

Tekrar-basma uygulanmaması durumunda buhar ayrışımından sonra kalan ısı yeryüzünde çevreye verilir. Rezervuardan üretilen toplam ısının yaklaşık %41'i, suyun %14'ü türbine giderken, üretilen ısının %59'u artık ısı olarak bulunmaktadır. Söz konusu %59'luk ısı, tekrar-basma uygulanmasıyla rezervuara döndürülmüş olur. Tekrar-basma uygulaması rezervuar enerjisini önemli oranda korur ve sahadan yapılacak yararlı enerjinin üretim potansiyelini artırır.

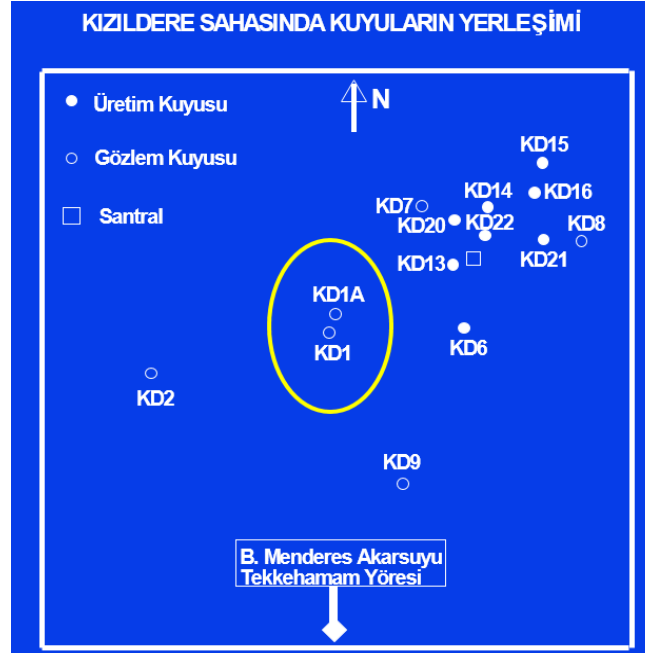
Yukarıda özetlenen yararlarından dolayı, yüzeyde kullanılmayan suyun çevreye verilmesi herhangi bir sorun doğursun veya doğurmasın, sahanın işletilmesinde tekrar-basma uygulaması gerekli olmaktadır.

6. TÜRKİYE'DE (KIZILDERE) TEKRAR-BASMA UYGULAMALARI

2005 yılına kadar Kızıldere sahasında bulunan 15 MWe kurulu güç kapasitesine sahip iken, sahaların ihalelerle özelleştirilmesi sonrasında, Ocak 2017 itibarıyla 775 MWe'a ulaşan kurulu güç kapasitesiyle Türkiye dünyada kurulu güç kapasitesini en hızlı geliştiren ülke konumundadır. Kurulu güç kapasitesinde bu hızlı gelişme paralelinde sahaların işletiminde gittikçe daha bilinçli, teknolojinin gerektirdiği yaklaşımlar kullanmaya yönelik stratejiler benimsenmektedir. Bu kapsamda, sahalarda tekrar-basma uygulamaları yaygınlaşmaktadır [15,16]. Burada Kızıldere sahasında gerçekleştirilmiş üç ayrı uygulama incelenmekte ve tartışılmaktadır.

5.1 Kızıldere'de İlk Tekrar-Basma Uygulaması

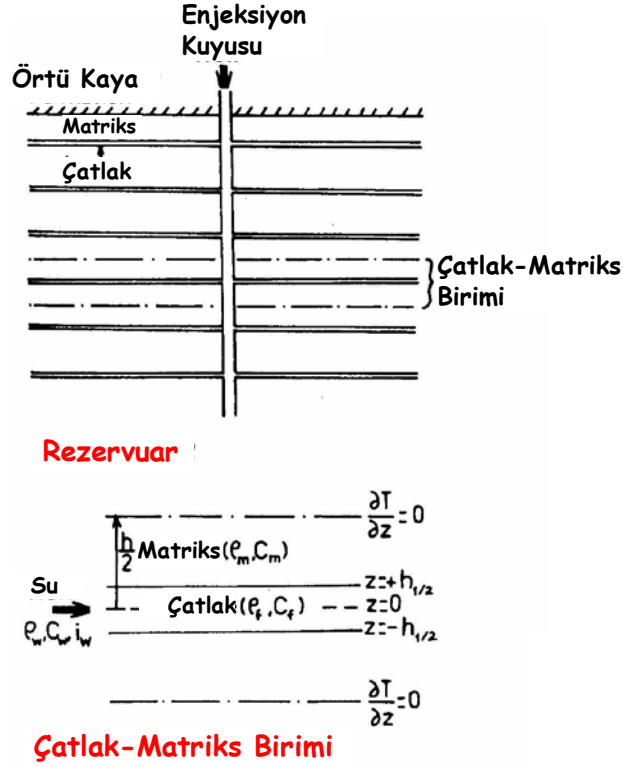
Kızıldere jeotermal sahası Batı Anadolu'da Denizli Aydın arasında Denizli'ye 40 km uzaklıkta, B. Menderes grabeni yapısı içindedir. Şekil 10 Kızıldere'de ilk tekrar-basma uygulaması sırasında sahada yer alan üretim ve gözlem kuyularının dağılımını göstermektedir. 1978 yılında gerçekleştirilen bu uygulamada 68 m aralıklı KD-1 ve KD-1A kuyularında soğuk su enjeksiyonu ile tekrar-basma denemesi gerçekleştirildi. Enjeksiyon kuyusundan 140 m tamamlanmış rezervuar kalınlığına 85 m³/st debide ve 40-80 °C sıcaklıkta su 11 haftalığına basıldı. Gözlem kuyusunda ise kuyudibi sıcaklığındaki değişim ölçüldü.



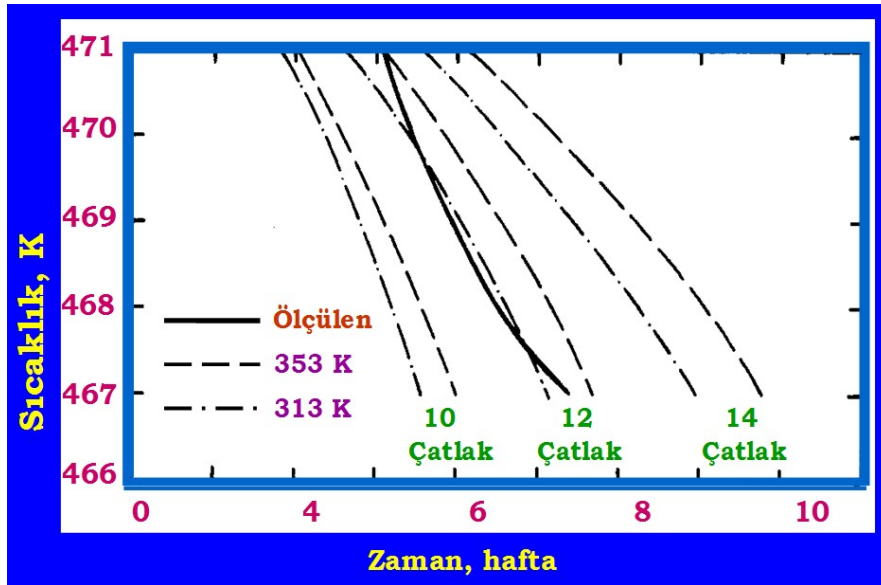
Şekil 10. Kızıldere'de ilk tekrar-basma uygulamasında kullanılan KD-1 ve KD-1A kuyularının yerleşimleri.

Söz konusu ölçülen sıcaklık değişimini incelemek için, bir doğal çatlaklı rezervuar modeli kullanılarak modelleme ve karşılaştırma çalışması yapıldı. Doğal çatlaklı rezervuar modeli olarak, birbirine paralel alt alta sıralanmış matriks tabakalar ve aralarında akışkan akışı için uygun çatlakların bulunduğu bir model kullanıldı [8]. Kullanılan doğal çatlaklı rezervuar modeli Şekil 11’de gösterilmektedir.

Şekil 12 gözlem kuyusunda ölçülen sıcaklık değişimi ve model sonuçları arasındaki çakışmayı göstermektedir. Modelleme çalışmasında en iyi çakışma, 140 m kalınlıklı rezervuarda 12 çatlağın bulunduğu durum için elde edildi.



Şekil 11. Kullanılan doğal çatlaklı rezervuarda ısı akışı modeli [8].

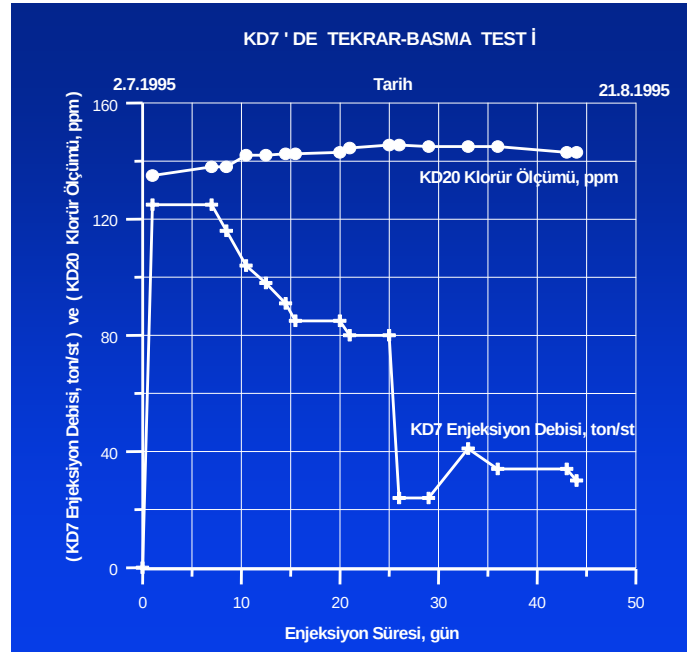


Şekil 12. 140 m kalınlıklı rezervuarda 12 çatlağın yeralması durumunda ölçülen sıcaklık değişimi ve model sonuçları arasındaki çakışma [8].

5.2 Kızıldere’de KD-7 Tekrar-Basma Uygulaması

Sahada 1995 Temmuz-Ağustos döneminde bir tekrar-basma denemesine başvuruldu [10]. Enjeksiyon kuyusu olarak sahada üretim bölgesinin kuzeyinde yeralan ve gözlem kuyusu olarak kullanılan KD-7 kuyusu seçildi. KD-7’den basılan su KD-7’ye en yakın üretim kuyusu olan KD-20’den alınmış, yüzeyde ayıraçtan ayrılan su bir boru hattı ile KD-7’nin susturucusuna ulaştırılmış ve 100 °C kuyubaşı sıcaklığında basılmıştır.

Test sırasında KD-7’den enjekte edilen su debisi kaydedilmiş, KD-20’de üretilen suyun sıcaklık ve klorür derişimi ölçülmüştür. Ancak KD-7’de basılan 100 °C’da suyun herhangi bir soğutma etkisi görülmedi. KD-20’de sıcaklık yanı sıra suyun klorür derişimi ölçüldü. Şekil 13 tekrar-basma süresince KD-20’de klorür ölçümünün değişimini göstermektedir. KD-20’de üretilen suyun test öncesi (orijinal) klorür derişimi 135 ppm idi. Buharı alındıktan sonra KD-7’den basılan sıvının klorür derişimi ise ortalama 145 ppm olarak ölçüldü. Testin başlangıcında KD-20’den üretilen suyun klorür derişimi 135 ppm iken 25 gün sonra 145 ppm’e ulaştıktan sonra önce sabit kalmış ve daha sonra da enjeksiyon debisindeki düşmeden dolayı azalmıştır.



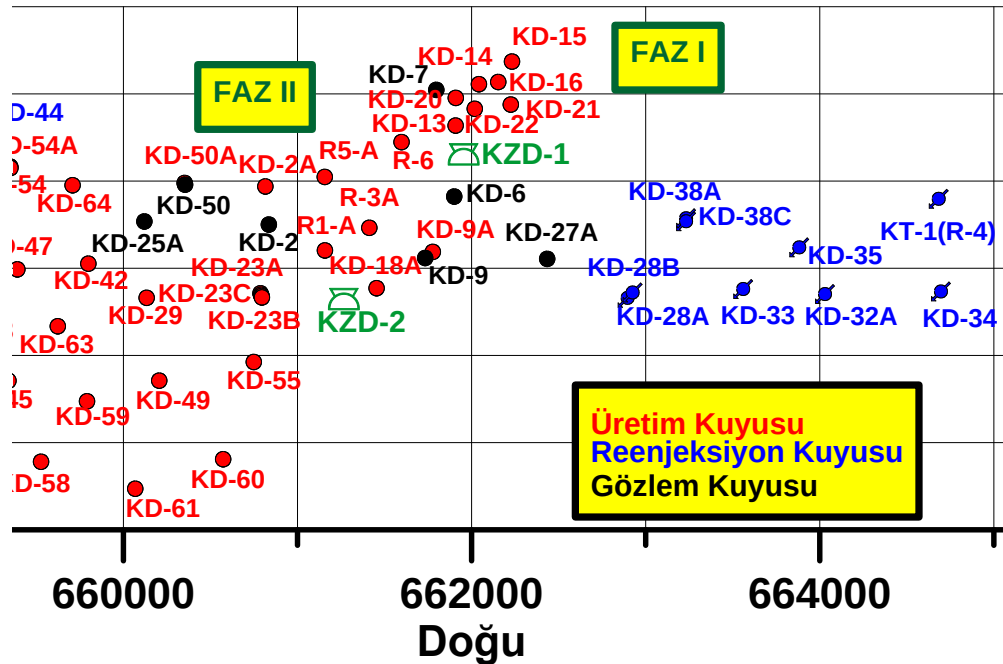
Şekil 13. Tekrar-basma süresince KD-20 kuyusundan üretilen klorür derişiminin değişimi [10].

İlk 25 günde görülen klorür derişimindeki artış KD-7’den KD-20’ye doğru ilerleyen hidrolik (kimyasal) cephenin hareketinden dolayıdır. Yapılan basit kütle denge hesapları basılan suyun yaklaşık %40 kadarının KD-20’ye ulaştığını göstermektedir. Hidrolik cephenin KD-20’ye varışı yaklaşık 10 gün alınır ve formasyon gözenekliliği 0.05 varsayılırsa, test sabit enjeksiyon debisinde sürdürülseydi, Denklem 3’ten hesaplanabileceği gibi, 140 günlük enjeksiyon sonunda ısı cephenin KD-20’ye varması ve dolayısıyla üretilen suyun sıcaklığında düşüşün gerçekleşmesi beklenirdi.

KD-20 kuyusundaki üretilen suyun klorür derişimindeki artış; hidrolik cephenin rezervuarda ilerleyişini, tercihi yönünü göstermesi ve üretim kuyuları ile enjeksiyon kuyusu arasındaki uzaklığı açıklaması yönünden önem taşımaktadır.

5.3 Kızıldere’de Güncel Tekrar-Basma Uygulaması (Üretilen Su İçinde Çözünmüş Kütlesel CO₂ Oranına Tekrar-Basmanın Etkisi

Şekil 14'te Kızıldere sahasında kuyu yerleşimlerinin güncel durumu gösterilmektedir. Üretilen suyun %71'i başarıyla tekrar-basılmaktadır [16]. Sahada kuyuların derinliklerine bağlı olarak, kuyuların sondaj sonrasında ölçülen orijinal kütsel CO₂ oranları kütsel olarak %1-4 arasında değişmektedir. Üretilen akışkandan su buharı ve gaz fazı ayıraçtan türbine giderken kalan (ihmal edilebilir CO₂ içeriğiyle) artık su rezervuara basılmaktadır.



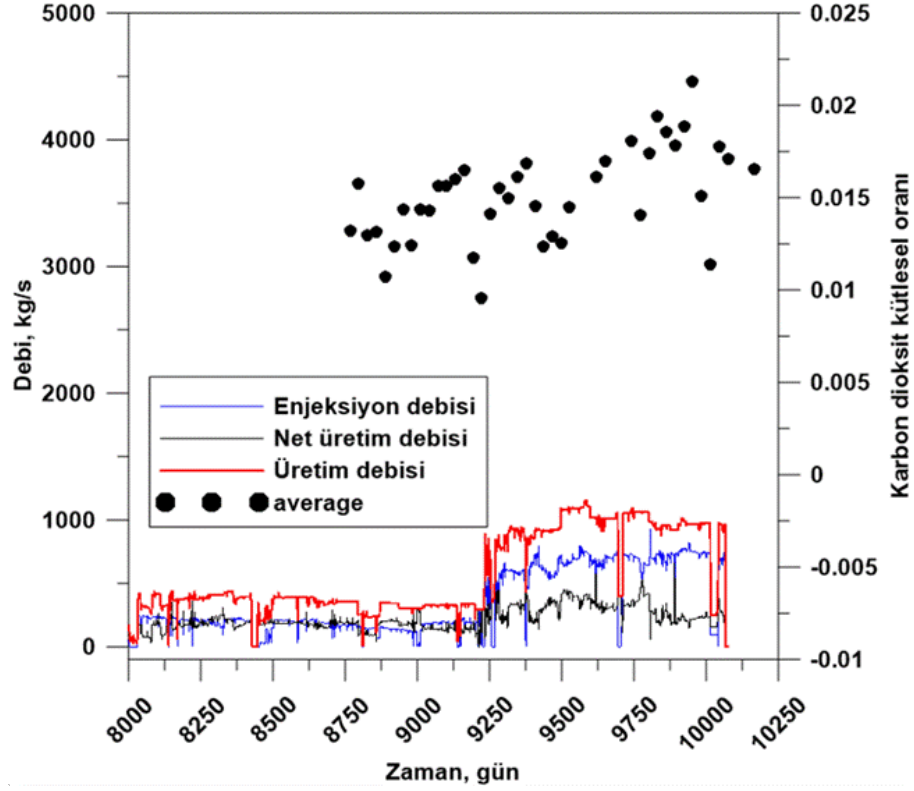
Şekil 14. Kızıldere sahasında kuyu yerleşimlerinin güncel durumu [16].

Şekil 15'te tüm kuyularda ölçülen CO₂ oranı saha ortalamasının zamanla değişimi gösterilmektedir. Daha derin ve yüksek basınçlı kuyuların devreye alınmasıyla CO₂ oranı saha ortalamasının, beklendiği gibi, yükseldiği görülmektedir.

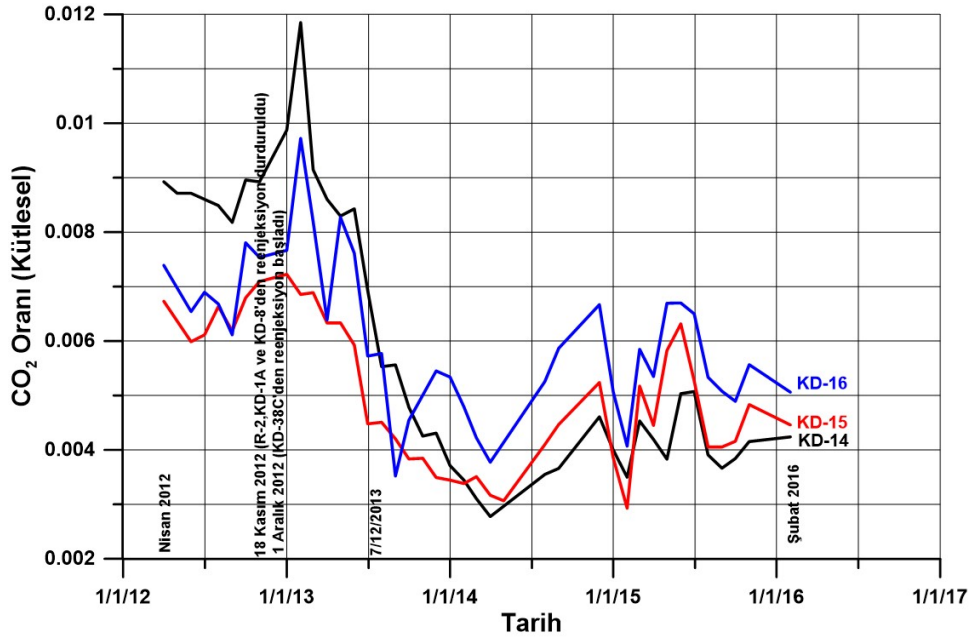
Şekil 16'da CO₂'siz artık suyun tekrar-basilmasından etkilenen KZD-1 (15 MWe kurulu güçte ilk Kızıldere jeotermal santrali) üretim kuyuları için ölçülen CO₂ oranının enjeksiyon başlangıcından itibaren düşüm gösterdiği açıkça görülmektedir.

Şekil 17’de KZD-1 santralına buhar sağlayan KD-14 kuyusunda ölçülen CO₂ oranının azalımı görülmektedir. Tekrar-basma başlamadan önce ölçülen CO₂ içeriği %1 iken enjeksiyon başladıktan kısa süre sonra hızla %0.4 değerine azalmıştır. Azalmanın nedeni ise, basılan CO₂’siz suyun, üretim kuyusuna varışından sonra rezervuardaki %1 CO₂ içeren su ile karışması ve bu karışımın üretilmesidir. Üretilen su karışımında basılan CO₂’siz su oranı arttıkça üretilen suyun CO₂ oranı azalmaktadır. Suyun CO₂ içeriği burada hidrolik cephenin hareketini temsil etmektedir.

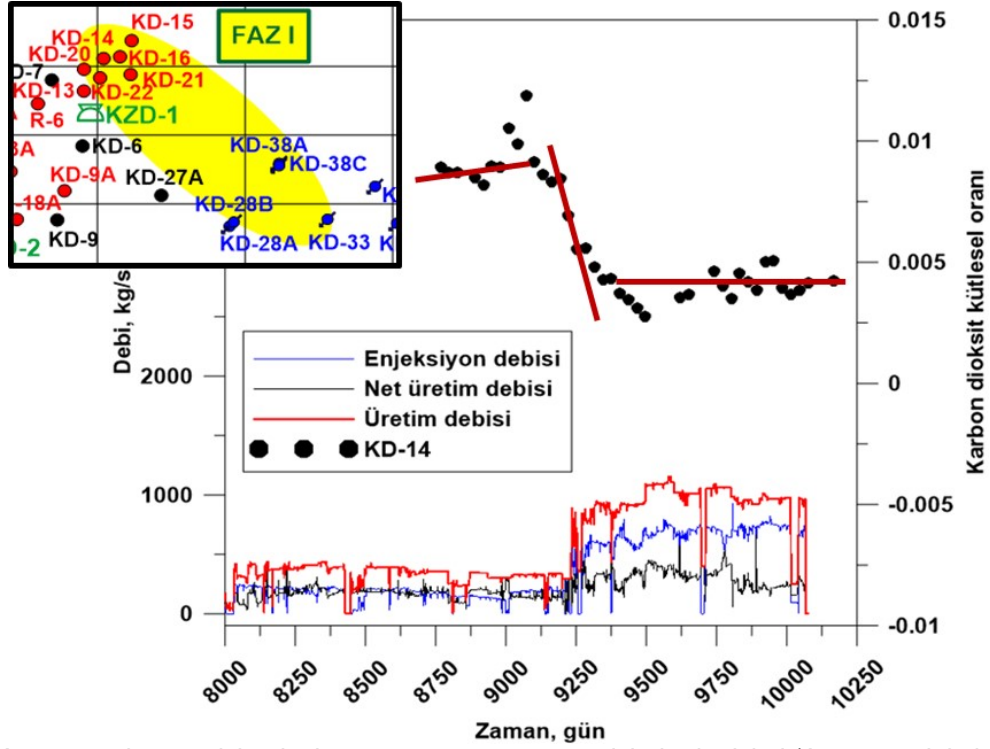
Burada incelenen uygulamada görüldüğü gibi, CO₂ içermeyen artık suyun enjeksiyonu sonrasında etkilenen üretim kuyularında yapılan CO₂ içeriği ölçümlerinin bir izleyici testine benzer olarak değerlendirilebileceği sonucuna varmak olasıdır.



Şekil 15. Tüm kuyularda ölçülen CO₂ oranı saha ortalamasının zaman içinde değişimi (Daha derin ve yüksek basınçlı kuyuların devreye girmesiyle daha yüksek CO₂ oranları gözlenmektedir) [16].



Şekil 16. Tekrar-basmadan etkilenen KZD-1 kuyuları için CO₂ oranının zaman içinde değişimi (KD-14 en fazla düşüş gözlemlenen kuyudur) [16].



Şekil 17. KD-14 kuyusu için ölçülen CO_2 oranının zaman içinde değişimi (Artan reenjeksiyondan dolayı üretilen su karışımı içinde CO_2 oranı azalmaktadır) [16].

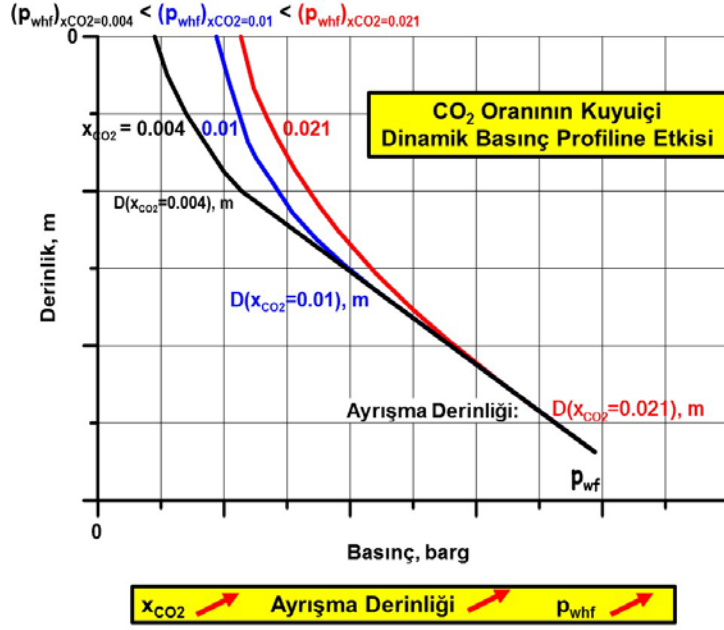
Bu tekrar-basma uygulamasında bir başka gözlem ise enjeksiyondan etkilenen ve CO_2 oranı azalan üretim kuyularında kuyubaşı akış basıncında ve sıcaklığında azalmalar olmasıdır. Söz konusu gözlem bir kuyuiçi akış modeliyle incelendiğinde, CO_2 oranının kuyuiçi dinamik akış profiline etkisi Şekil 18'de verildiği gibidir. Üretilen su içinde çözünmüş kütleli CO_2 oranı (X_{CO_2}) azaldıkça kuyubaşı akış basıncı azalmakta, kuyu içinde sıvı fazdan iki faza geçişin olduğu ayrışma derinliği ise yüzeye doğru sığ derinliklere hareket etmektedir.

Enjeksiyondan etkilenen üretim kuyularında oluşan kuyubaşı akış basınç ve sıcaklığında azalma konusunun, Türkiye'de CO_2 içeren jeotermal rezervuarların sürdürülebilir işletiminde olumsuzluklara neden olduğundan dolayı, dikkatle gözlemlenmesi ve incelenmesi gerekmektedir. Gerektiğinde üretim ve enjeksiyon kuyularının yerlerinin değiştirilmesi, enjeksiyon debilerinin düşürülmesi, enjekte edilen suyun CO_2 içeriğinin yüksek tutulması vb. önlemlere başvurulmalıdır.

SONUÇLAR

Bu bildiride, tekrar-basma uygulanması incelenmektedir. Bildiride tartışılan konular ve sonuçlar belirli varsayımlara dayanarak basitleştirilmiş ısı akışı modellerinden elde edilmektedir. Sonuçlar; tekrar-basma uygulamasının tasarımında özenle seçilmesi gerekli parametrelerin enjeksiyonun yapıldığı rezervuar kalınlığı, enjeksiyon debisi ve enjeksiyon ile üretim kuyu aralıkları olduğunu göstermektedir.

Sahada tekrar-basma uygulamasına geçmeden önce enjektivite ve izleyici testi gibi pilot testlerin yapılması ve elde edilecek sonuçlara göre tekrar-basma uygulaması tasarımının yapılması doğru olacaktır. Gerek pilot testler sırasında ve gerekse de saha uygulaması sırasında sahadaki kuyular kimyasal ve ısıl gözlem noktaları olarak kullanılmalıdır. Rezervuardaki suyun ve üretilen suyun kimyasal bileşiminin tekrar-basmadan etkilenerek değiştiği gerçeği ihmal edilmemelidir.



Şekil 18. CO₂ oranının kuyuiçi dinamik basınç profiline, kuyubaşı akış basıncına ve ayrışma derinliğine etkisi [16].

Türkiye’de genelde tüm jeotermal rezervuarlarda üretilen suların çözünmüş olarak CO₂ içerdiği bilinmektedir. Bu tür sahalarda tekrar-basmanın etkileri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Üretilen ve rezervardaki suyun CO₂ oranı düşer; basıncın korunmasına rağmen suyun CO₂ çözünürlüğü doymuşluk değerinin altına düşer.
- Üretilen suyun rezervuar ve kuyudibi basıncı değişmese bile, CO₂ içeriği azaldığı için kuyubaşı akış basıncı ve sıcaklığı azalır, kuyuiçinde ayrışma derinliği yüzeye yaklaşır, kuyu üretim davranışını olumsuz etkiler.
- Üretim kuyularında CO₂ azalması olduğu durumlar, enjeksiyon ve üretim kuyuları arasında bir izleyici testi gibi değerlendirilebilir. Üretilen suyun CO₂ oranı azalmaya başladığı zamandan (t_H) sonra yaklaşık $t_T \cong t_H / (1.5\phi)$ zamanında sıcaklığında azalması beklenir.

Jeotermal sahanın işletilmesinde, üretim ve enjeksiyonun birlikte düşünülmesi, planlanması, tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Tekrar-basma uygulaması, bu bildiride ayrıntılı olarak incelendiği gibi, jeotermal sahaların uygun ve sürdürülebilir işletilmesinin olmazsa olmaz koşullarından birisidir.

Tekrar-basma; jeotermal sahaların sürdürülebilir işletilmesi için zorunlu, doğanın korunması için gerekli, rezervuardan daha fazla enerji üretimini sağladığı için ekonomik özellikli bir işlemdir.

KAYNAKLAR

- [1] SATMAN, A., “Tekrar-Basma (Reenjeksiyon)”, Teskon 2005, VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, Jeotermal Enerji Seminer Kitabı, 121-141, 23-26 Kasım 2005.
- [2] LAUWERIER, H.A., “The Transport of Heat in an Oil Layer Caused by Injection of Hot Fluid”, *Applied Scientific Research* (1955) A5, 145-150.
- [3] GRINGARTEN, A.C., SAUTY, J.P., “A Theoretical Study of Heat Extraction From Aquifers With Uniform Regional Flow”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. 35, December 10, 1975, 4956-4962.
- [4] BODVARSSON, G., “On the Temperature of Water Flowing Through Fractures”, *Journal of Geophysical Research*, (April 15, 1969), 74, No. 8, 1987.

- [5] BODVARSSON, G.S., TSANG, C.F., Injection and Thermal Breakthrough in Fractured Geothermal Reservoirs, Report No. LBL-12698, LBL-U. of California, Berkeley, May 1981.
- [6] SATMAN, A., Reinjection, (Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Editor: H.J. Ramey, Jr., Chapter 10), Stanford University, October 1981.
- [7] SATMAN, A., Jeotermal Rezervuarlarına Soğuk Su Enjeksiyonu ile Enerji Üretiminin İncelenmesi ve Türkiye’de Uygulanabilirliği, Proje MAG-593, TÜBİTAK, Ankara, Nisan 1983.
- [8] SATMAN, A., “Solutions of Heat and Fluid Problems in Naturally Fractured Reservoirs: Part 1- Heat Flow Problems”, *SPE Production Engineering*, 463-466, Nov. 1988.
- [9] SATMAN, A., ALKAN, H., SERPEN, U., “Kızıldere Jeotermal Rezervuarına Tekrar-Basma Uygulamasında Isıl Kirlenmenin Kuramsal İncelenmesi”, Türkiye 8. Petrol Kongresi, Ankara, Nisan 1990, 301-308.
- [10] SATMAN, A., SERPEN, U., UĞUR, Z., TÜRKMEN, N., “Kızıldere Jeotermal Rezervuarı Üretim Performansının ve Tekrar-Basma Testinin Analizi”, *Türk Petrol ve Doğal Gaz Dergisi*, Vol. 3, No. 2, 56-64, Haziran 1997.
- [11] SATMAN, A., UĞUR, Z., ONUR, M., “The Effect of Calcite Deposition on Geothermal Well Inflow Performance”, *Geothermics*, June 1999, 4(1), 425-444.
- [12] SATMAN, A., SERPEN, U., MIHCAKAN, İ.M., “Assessment of Reinjection Trials in Kizildere Geothermal Field”, World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 28 May-10 June 2010.
- [13] SATMAN, A., “Sustainability of a Geothermal Reservoir”, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- [14] SATMAN, A., “Sustainability of Geothermal Doublets”, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Jan. 31-Febr. 2 2011.
- [15] TUREYEN, O.I., GULGOR, A., ERKAN, B., SATMAN, A., “Recent Expansions of Power Plants in Guris Concession in the Germencik Geothermal Field”, Forty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Febr. 22-24, 2016.
- [16] SATMAN, A., TUREYEN, O.I., BASEL, E.D.K., GUNAY, A., SENTURK, E., KINDAP, A., “Effect of Carbon Dioxide on the Well and Reservoir Performances in the Kizildere Geothermal Field”, Forty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Febr. 13-15 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman SATMAN

İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü’nden 1973’te Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği ABD’deki Stanford Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümü’nden MS ve doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi’nde Assistant Professor olarak çalıştıktan sonra Temmuz 1980’de İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü’nde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan’da KFUPM Research Institute’te çalıştı. 37 yıl görev yaptığı İTÜ’den Ocak 2017 itibariyle emekli oldu. İdari görevler olarak İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü bölüm başkanlığı ve İTÜ Enerji Enstitüsü müdürlüğü yaptı. İlgi alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliğinin üretim ve rezervuar mühendisliği konuları bulunmaktadır.