

TEKRAR-BASMA (REENJEKSİYON)

Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Suyun etken olduğu jeotermal rezervuarlardan çok yüksek miktarlarda sıcak su üretimi yapılır. Üretilen sıcak suyun bir kısmı sıcak su olarak doğrudan kullanılırken geri kalan önemli bir kısmı ise merkezi jeotermal ısıtma sistemlerinde ısı alınıldıktan sonra artık su olarak kalır. Artık su saha yakınındaki deniz, göl ve akarsu gibi yerlere verilebilirse, her jeotermal sahanın yakınında bu tür olanaklar bulunmayabilir. Kaldı ki olsa bile hem en doğru çözümdür ve hemde bazı çevre sorunları kaçınılmazdır. Dolayısıyla doğru olanı, suyu geldiği yere veya uygun yeraltı formasyonlarına basmaktır.

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

Tekrar-basma işleminin 3 önemli amacı vardır:

- 1) Yeryüzünde üretildikten sonra kalan artık sudan kurtulmak.
- 2) Rezervuar basıncını korumak.
- 3) Rezervuardan daha fazla ısı üretimini sağlamak.

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.

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. Suyun ısısının toplam rezervuar ısısına oranı,

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

olarak verilebilir. Kayaç yoğunluğu için $\rho_r = 2.65 \rho_w$ ve kayaç ısı kapasitesi için $C_r = C_w / 4$ yaklaşık ilişkileri varsayırsa, 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.

$$\frac{v_t}{v_h} = \frac{\phi}{\phi + 0.66(1 - \phi)} \quad (3)$$

Burada, v_t ısı cephesinin hızını ve v_h ise hidrolik cephesinin hızını 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 yarıküresel olarak gelişebileceği gibi laminer veya türbülans olabilir. Akışkan tek veya iki fazlı olarak akabilir. Kaynak [1] - [8] 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, seracılık, 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 (Satman, 1981):

1. Kullanılmayan sıcak suyun çevreyi kirlenmesi 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 anlaşılacağı gibi, söz konusu oran % 5-15 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.

2.2. Tekrar-Basmanın Tasarımı

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

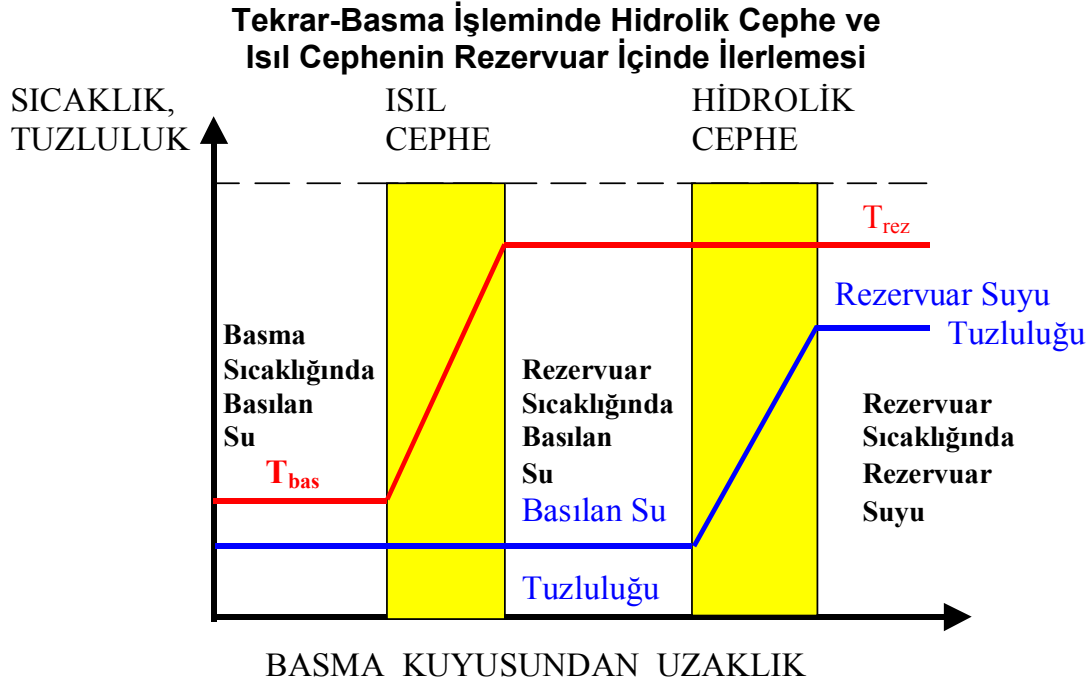
- a. Suyun basıldığı bölgedeki hidrolojik koşullar iyi belirlenmelidir. Basılan suyun doğrudan ana jeotermal bölgesine gitmeyip te çevreye yayılması ve kirlenme sorunları doğurması gözardı edilmemelidir. Özellikle çevredeki içilebilir veya kullanılabilir su kaynaklarına zarar verilmemesi gerekmektedir. 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. Üretilen akışkanın buhar fazının ayrılmadığı durumlarda, enjekte edilen su ile rezervuardaki orijinal su arasında gözlenebilir ölçekte kimyasal bileşim farkı olmayabilir. Yine de enjekte edilen suyun kimyasal bileşim analizinin yapıp, orijinal su bileşimiyle karşılaştırılmasından sonra kimyasal bileşim farkının gözlenmesi konusu kararlaştırılmalıdır.
- b. Yüzey donanımlarında, enjeksiyon kuyusunda ve suyun basıldığı formasyonda oluşabilecek mineral çökmesi önemli sorunlar yaratabilir (Satman, Uğur ve Onur, 1999). Olası çökme sorununu ve su içinde askıda katı maddelerin formasyonu kirlenme 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 ısı cephesinden) daha hızlı hareket edecektir (Satman vö., 1997). Şekil 1 ısı 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-gerekmeyeceği ve suyun nereye basılacağı sayılabilir. Basılan suyun debisi biliniyorsa, ısı kirlenmeyi önlemek için rezervuarınkinden 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 rezervardaki 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, kayaçla temas eden su ısınırken kayaç ise soğuyacaktır. Düşük sıcaklık zonunun formasyonda ilerleme hızı basılan suyun hidrolik ilerleme hızından doğal olarak daha



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

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.

3. ENJEKSİYON İŞLEMİNDE KUYULARIN ÖNEMİ

Bir jeotermal sahada herhangi bir kuyunun enjeksiyon kuyusu olarak kullanılması durumunda kuyuya ait 3 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 filtrelili (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 makinesiyle 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 azalıyor ise 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:

- enjeksiyon kuyularının üretim sahasını çevreleyen konumda yerleştirilmesi,
- olduğunca üretim zonundan daha derin formasyona enjekte edilerek, akışkanın akış sırasında ısındıktan sonra oluşan yoğunluk düşümü neticesinde yukarılara hareket ederek üretim kuyularına varması,
- enjekte edilen soğuk akışkanın rezervuar içinde ısındıktan 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 ısıl 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_o olan bir rezervuara T_i 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

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

$$\theta = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2}, \text{ boyutsuz hacimsel ısı kapasitesi}$$

$$r_D = \frac{2\lambda\pi r^2}{\rho_w C_w q b}, \text{ boyutsuz yarıçap}$$

$$t_D = \frac{\lambda t}{\rho_1 C_1 b^2}, \text{ boyutsuz zaman}$$

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

$$t_{BT} = \frac{\pi r^2 h \rho_1 C_1}{\rho_w C_w q} \quad (5)$$

denklemlerle bulunur. Burada $\rho_1 C_1$ jeotermal rezervuar için hacimsel ısı kapasitesi olup

$$\rho_1 C_1 = (1 - \phi) \rho_r C_r + \phi \rho_w C_w \quad (6)$$

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

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

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

ρ_w = su yoğunluğu, kg/m³

C_w = suyun ısı kapasitesi, J/kg.°C

ρ_r = rezervuar kayacı yoğunluğu, kg/m³

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

ϕ = gözeneklilik

t = enjeksiyon zamanı, s

q = enjeksiyon debisi, m³/s

$h = 2b$ = rezervuar kalınlığı, m

T = rezervuar içindeki sıcaklık, °C

Şekil 2'de görüldüğü gibi tekrar-basma sırasında enjeksiyon kuyusu etrafında basılan suyun oluşturduğu bir zon bulunur. Bu zonen 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 zonenin rezervuarda 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.

4.2. Kuyuçifti İçin Rezervuarda Sıcaklık Dağılımı

Denklem 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, ısı cephenin üretim kuyusuna varış zamanı

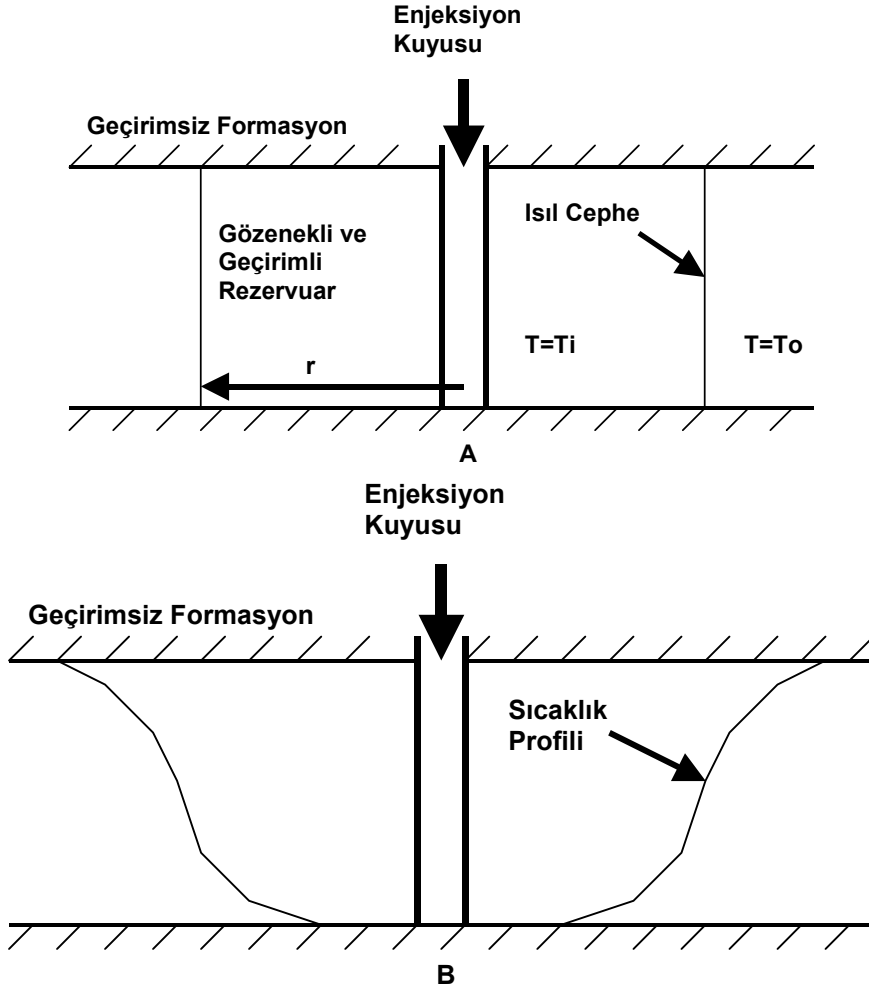
$$t_{BT} = \frac{r^2 h \rho_1 C_1}{\rho_w C_w q} \quad (7)$$

denklemlerle verilir. Denklem 5 ve 7, ısı kirlenmenin oluşmayacağı koşulları (veya güvenilir aralığı) belirlemek üzere tekrar-basma tasarımında kullanılabilir.

Kuyuçifti modelinde rezervuar içinde sıcaklık dağılımını bulmak için çözümü Şekil 4'te verilen Gringarten-Sauty (1975) modeli kullanılabilir.

4.3. Doğal Çatlaklı Rezervuarda Sıcaklık Dağılımı

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

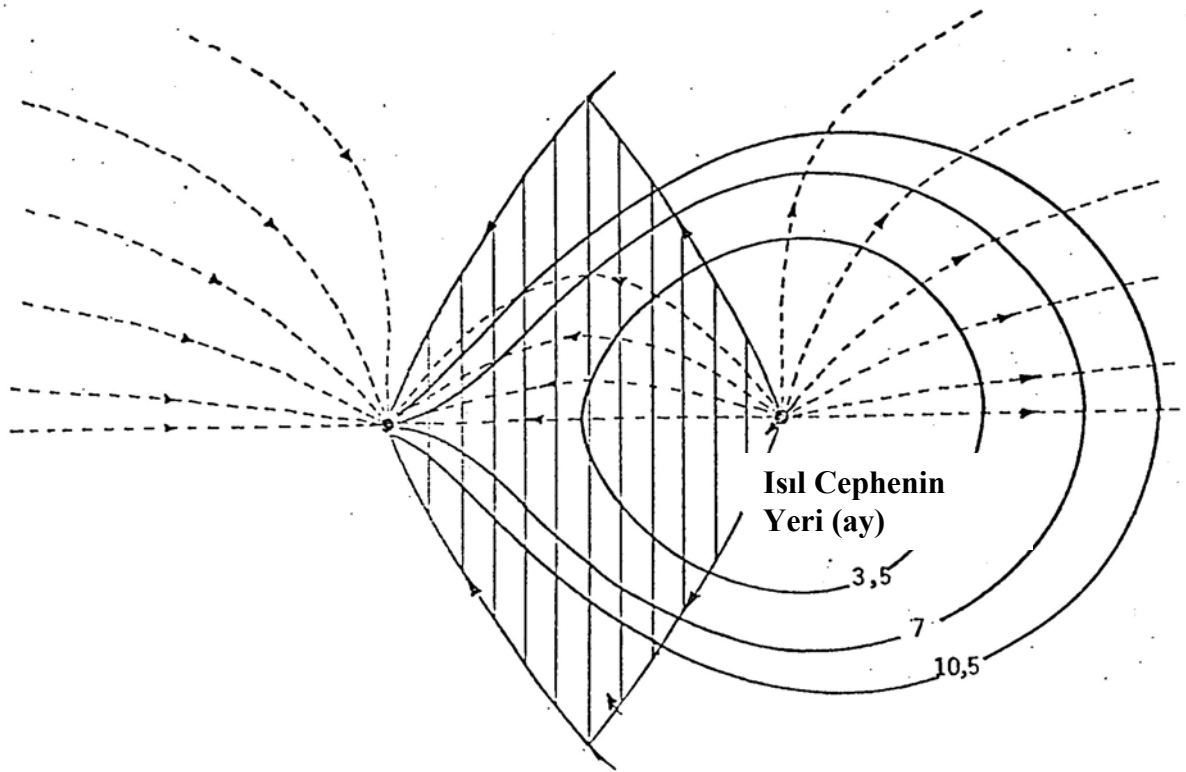


Şekil 2. Başlangıç sıcaklığı T_0 olan gözenekli ortama T_i sıcaklığında çevrel akışta su basılmasında oluşan sıcaklık dağılımı: (a) Alt ve üstteki geçirimsiz formasyonlara ısı geçişi olmaması durumu b) Alt ve üstteki geçirimsiz formasyonlara ısı geçişi olması durumu.)

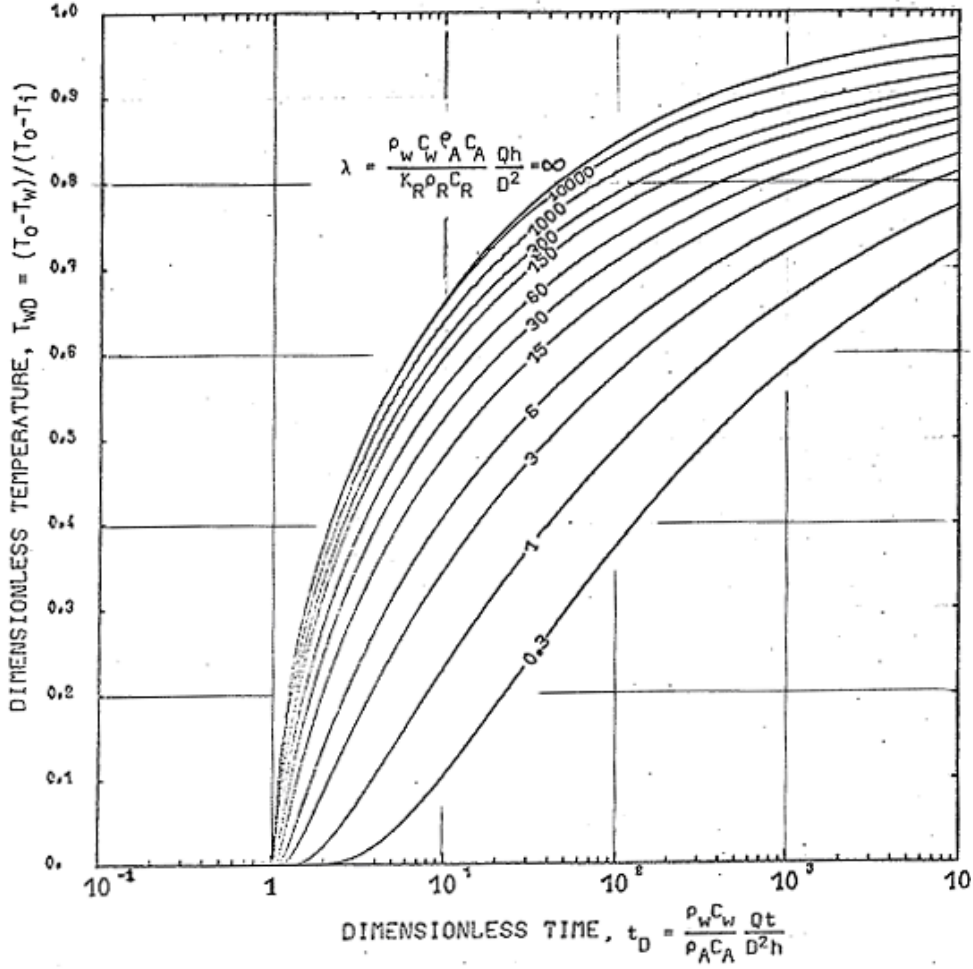
Şekil 5'te görüldüğü gibi, enjeksiyon kuyusu etrafında enjeksiyon suyu sıcaklığında bir soğuk zon oluşur. Bu zonun önünde bir geçiş zonu yer alır. Daha da ileride ise orijinal rezervuar sıcaklığında bir sıcak su zonu vardır. Enjeksiyon kuyusundan geçiş zonuna kadar olan bölgede çatlak içinde ısı taşınımı gerçekleşir. Geçiş zonu içinde ise, kayaç matrisinden çatlakla doğru akış ısı iletimi ile olur.

Şekil 6'da 0.1-0.9 boyutsuz sıcaklık 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 ($\tau=0.1$), matrisle çatlak arasında ısı alışverişi başlamaktadır, sıcaklık konturları matris içine doğru yayılmaktadır. Büyük zaman değerinde ($\tau=1$) tüm sistem (çatlak+matris) içinde ısı cephe oluşmakta ve bir düz doğru şeklinde enjeksiyon kuyusundan üretim kuyusuna doğru hareket etmektedir.



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



Şekil 4. Kuyuçifti modelinde rezervuar içinde sıcaklık dağılımını bulmakta kullanılan Gringarten-Sauty (1975) grafiği.

T_0 =Orijinal rezervuar sıcaklığı, °C

T_i =Enjeksiyon sıcaklığı, °C

T_w =t enjeksiyon zamanında ve D uzaklığında suyun sıcaklığı, °C

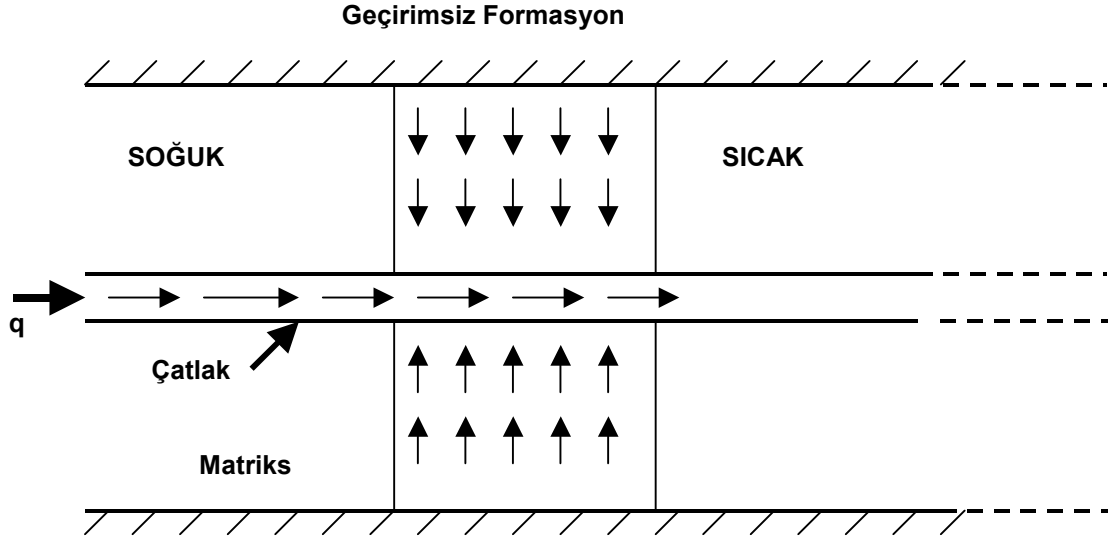
K_R =Alt ve üst formasyonların ısı iletkenliği, J/m³.°C

h=Rezervuar kalınlığı, m

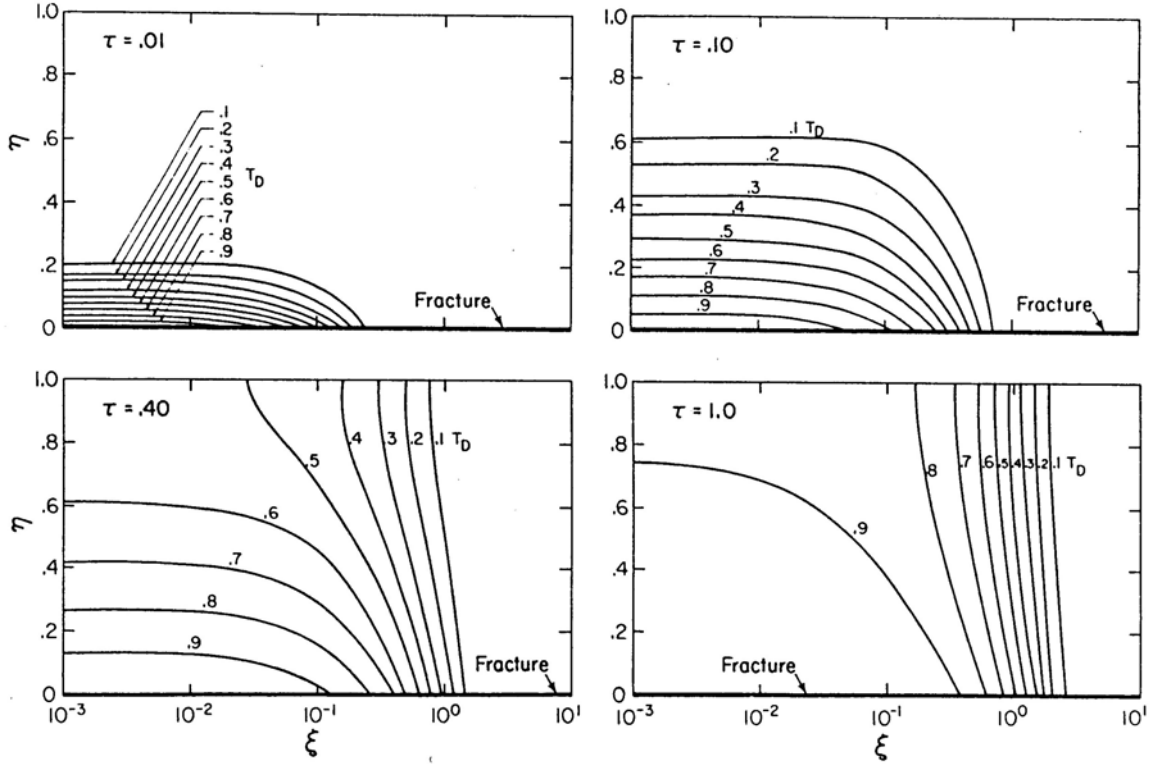
Q=Enjeksiyon debisi, m³/st

$\rho_A C_A$ =Rezervuarın hacimsel ısı kapasitesi, J/m³.°C

$\rho_R C_R$ = Alt ve üstteki formasyonların hacimsel ısı kapasitesi, J/m³.°C



Şekil 5. 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 6. Çatlaklı bir rezervuarda farklı enjeksiyon zamanlarında sistem içinde sıcaklık dağılımları. (Bodvarsson ve Tsang, 1981)

5. TEKRAR-BASMA UYGULAMASININ TASARIMI

Tekrar-basma uygulaması için gerekli tasarım parametrelerini belirlemek üzere modelleme çalışması yapılabilir. Sahada kuyuların yerleşim koşullarına bağlı olarak, modelleme çalışmasında enjeksiyon ve üretim kuyularının enjeksiyon-üretim kuyu çifti oluşturacak şekilde davranması veya enjeksiyon kuyularından basılan suyun çevresindeki üretim kuyularından etkilenmeden hareketi ayrı ayrı modeller olarak incelenebilir.

Modelleme çalışmasında gerekli parametreler: enjeksiyon debisi, enjekte edilen formasyon kalınlığı, enjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki aralık ve enjeksiyon süresidir. Bu bölümde incelenen modelde kullanılmak üzere jeotermal rezervuarı için 130 °C rezervuar sıcaklığı, 60 °C enjeksiyon sıcaklığı ve % 5 rezervuar gözenekliliği örnek olarak alındı.

Şekil 7, tekrar-basma uygulamasında ısıl kirlenmenin oluşmaması için gerekli enjeksiyon ve üretim kuyuları güvenilir aralığını, formasyon kalınlığı, enjeksiyon debisi ve enjeksiyon süresi için vermektedir. Örneğin, 100 m kalınlıkta formasyona 100 m³/st debide su basılması durumunda 20 aylık sürekli enjeksiyon sonunda ısıl kirlenme cephesinin üretim kuyusuna varmaması için üretim kuyusu enjeksiyon kuyusundan en az 150 m uzaklıkta yerelmalıdır. Doğal olarak enjeksiyon debisi artırılırsa gerekli güvenilir aralık artırılmalıdır. Debi sabit tutulup, formasyon kalınlığı artırılırsa, gerekli güvenilir aralık azalacaktır. Diğer taraftan, ısıl cephenin üretim kuyusuna ulaşması enjeksiyon süresiyle ilişkilidir ve enjeksiyon ve üretim kuyuları güvenilir aralığı artarsa ısıl cephenin üretim kuyusuna varması için gerekli enjeksiyon süresi de artacaktır. 100 m³/st debide 100 m kalınlıklı bir formasyona 20 ay enjeksiyonda gerekli güvenilir aralık 150 m iken, 40 aylık enjeksiyon sonunda üretim kuyusuna ısıl cephenin varmamış olması için gerekli aralık en az 215 m olmalıdır.

Şekil 7 enjeksiyonun sürekli olarak yapıldığı genel bir tekrar-basma uygulaması için kullanılabilir. Ancak, İzmir Balçova-Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek gibi sahalarda sahanın etkin olarak işletildiği soğuk dönemde enjeksiyon yapılırken, yılın sıcak döneminde ise enjeksiyon minimum düzeyde olacak veya yapılmayacaktır. Dolayısıyla, üretim-enjeksiyon kuyu çifti modeli, rezervuara enjeksiyon döneminin yılın 8 ayı süreceği varsayılarak, gerekli güvenilir kuyu aralığı değerlerini enjeksiyon debisi ve formasyon kalınlığına bağlı olarak tahmin edebilmek için kullanılabilir.

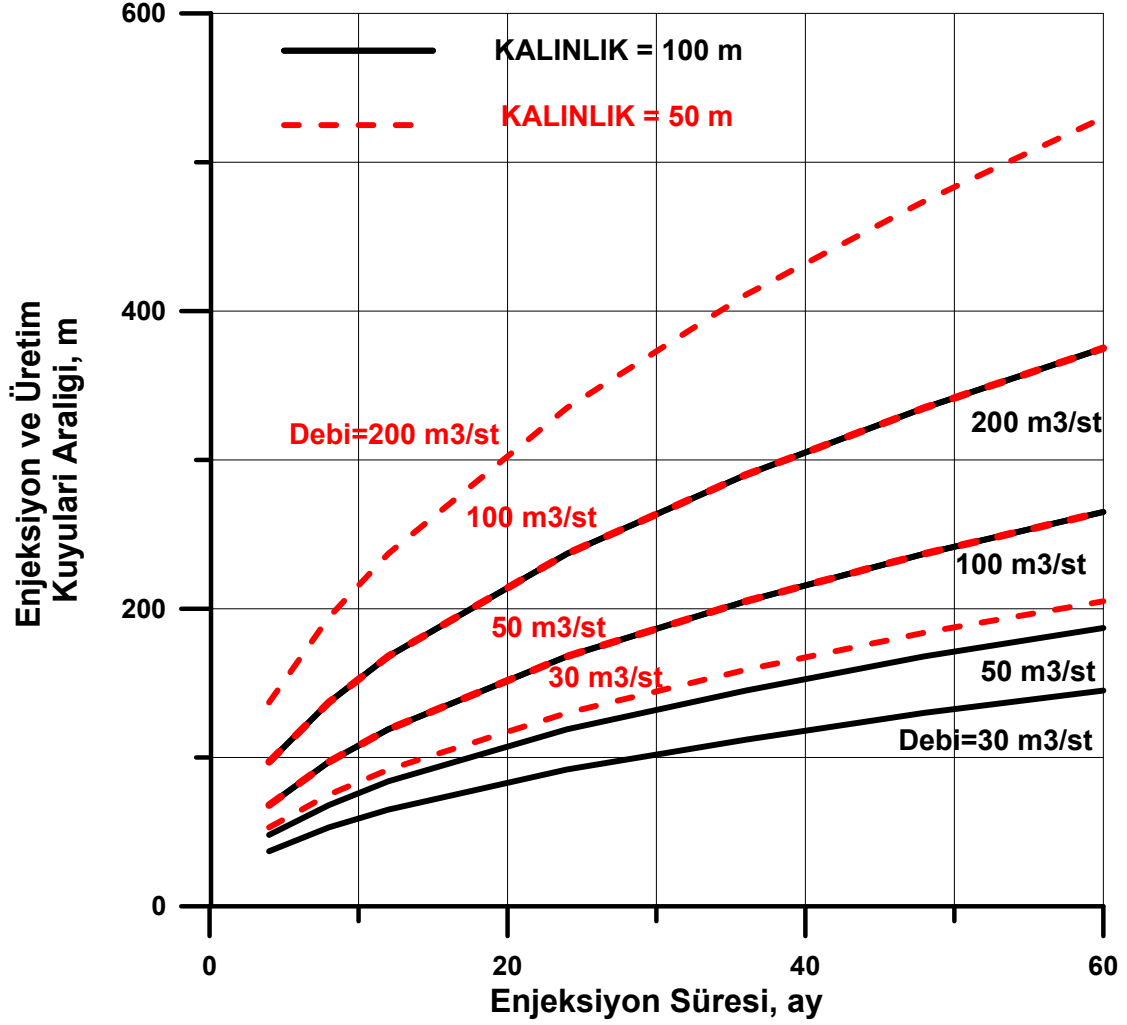
Şekil 8 sekiz ay süresince sabit debide enjeksiyon yapılması durumunda ısıl kirlenmenin üretim kuyusunda oluşmaması için güvenilir aralık sonuçlarını vermektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi enjeksiyon debisi arttıkça güvenilir aralık ta artmakta, formasyon kalınlığı arttıkça aralık azalmaktadır. Örneğin, 100 m kalınlıktaki formasyona 100 m³/st debide soğuk akışkan basılması durumunda ısıl cephenin üretim kuyusuna varmaması için (veya üretim kuyusunda ısıl kirlenmenin oluşmaması için) üretim kuyusu enjeksiyon kuyusundan en az 95 m uzaklıkta olmalıdır.

Isıl cephe üretim kuyusuna vardktan sonra enjeksiyona devam edilirse, üretim kuyusundan üretilen suyun sıcaklığı zamanla azalacaktır. Değişen kuyubaşı sıcaklığının enjeksiyon süresi ve formasyon kalınlığına bağlı olarak değişimini belirlemek üzere üretim-enjeksiyon kuyu çifti modeli kullanıldı ve elde edilen sonuçlar Şekil 9'da gösterilmektedir. Sonuçlar, 100 m aralıklı enjeksiyon ve üretim kuyuları için, enjeksiyon ve üretim debisinin 108 m³/st olması durumunda formasyon kalınlığının 100 m ve 300 m alınması koşullarında kuyubaşı sıcaklığı ile enjeksiyon süresi ilişkisini vermektedir. 100 m kalınlık için ısıl cephe 0.65 yılda üretim kuyusuna varmakta, enjeksiyonun sürdürüldüğü büyük zaman değerlerinde kuyubaşı sıcaklığı azalmaktadır. Şekil 7-9 tekrar-basma uygulamalarında, uygulamaların tasarlanmasında gerekli önemli parametreleri belirlemeye yardımcı olacak sonuçları içermektedir.

ISIL KİRLENMENİN OLUŞMAMASI İÇİN GÜVENİLİR ARALIK
(ÜRETİM-ENJEKSİYON KUYU ÇİFTİ MODELİ)

Varsayımlar:

- 1) 130°C rezervuara 60°C'da su basılmaktadır.
- 2) Su sabit debide basılmaktadır.
- 3) Enjeksiyon kuyusundan basılan debi ile üretim kuyusu debisi aynıdır.
- 4) Rezervuar rezervuar gözenekliliği % 5'tir.

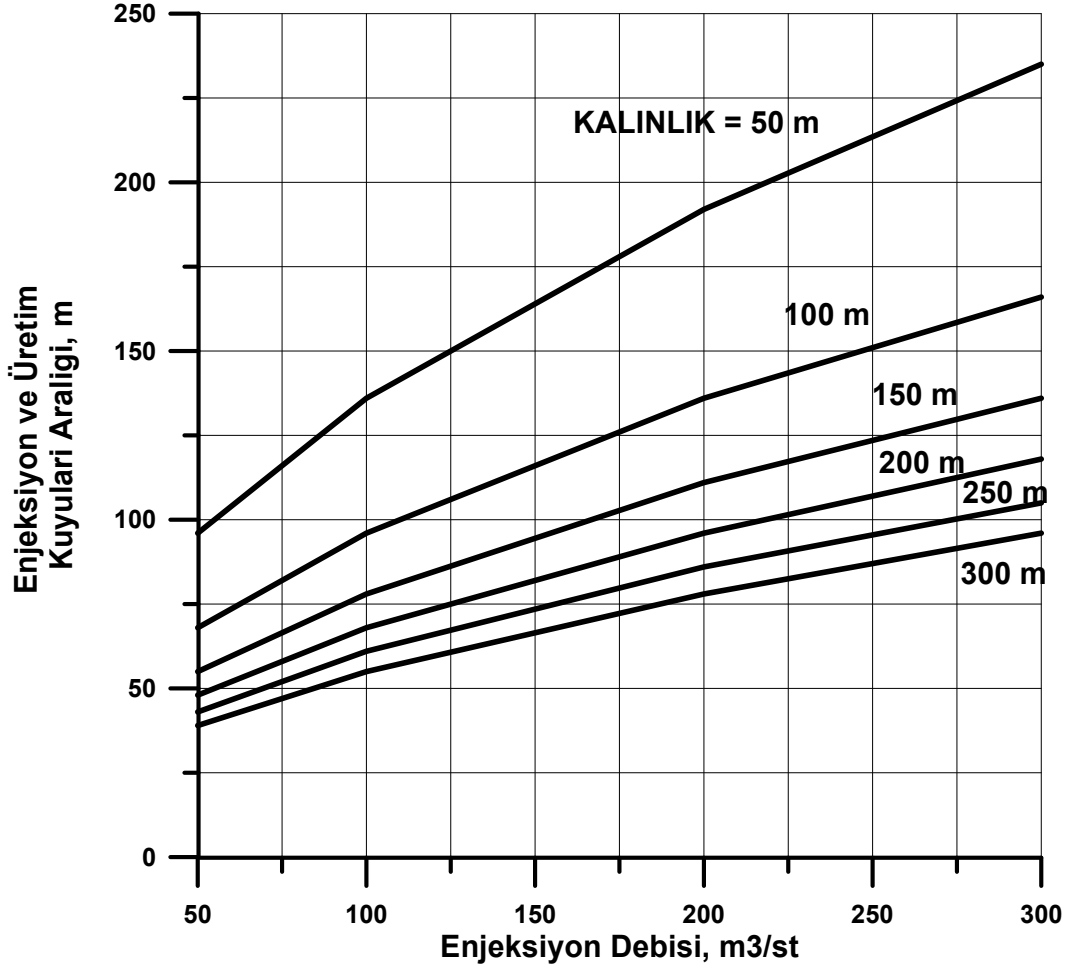


Şekil 7. Isıl kirlenmenin oluşmaması için gerekli güvenilirlik aralık grafiği.

**ISIL KIRLENMENİN OLUŞMAMASI İÇİN GÜVENİLİR ARALIK
(ÜRETİM-ENJEKSİYON KUYU ÇİFTİ MODELİ)**

Varsayımlar:

- 1) 130°c rezervuara 60°c'da su basılmaktadır.
- 2) Su sabit debide basılmaktadır.
- 3) Enjeksiyon kuyusundan basılan debi ile üretim kuyusu debisi aynıdır.
- 4) Rezervuar rezervuar gözenekliliği % 5'tir.

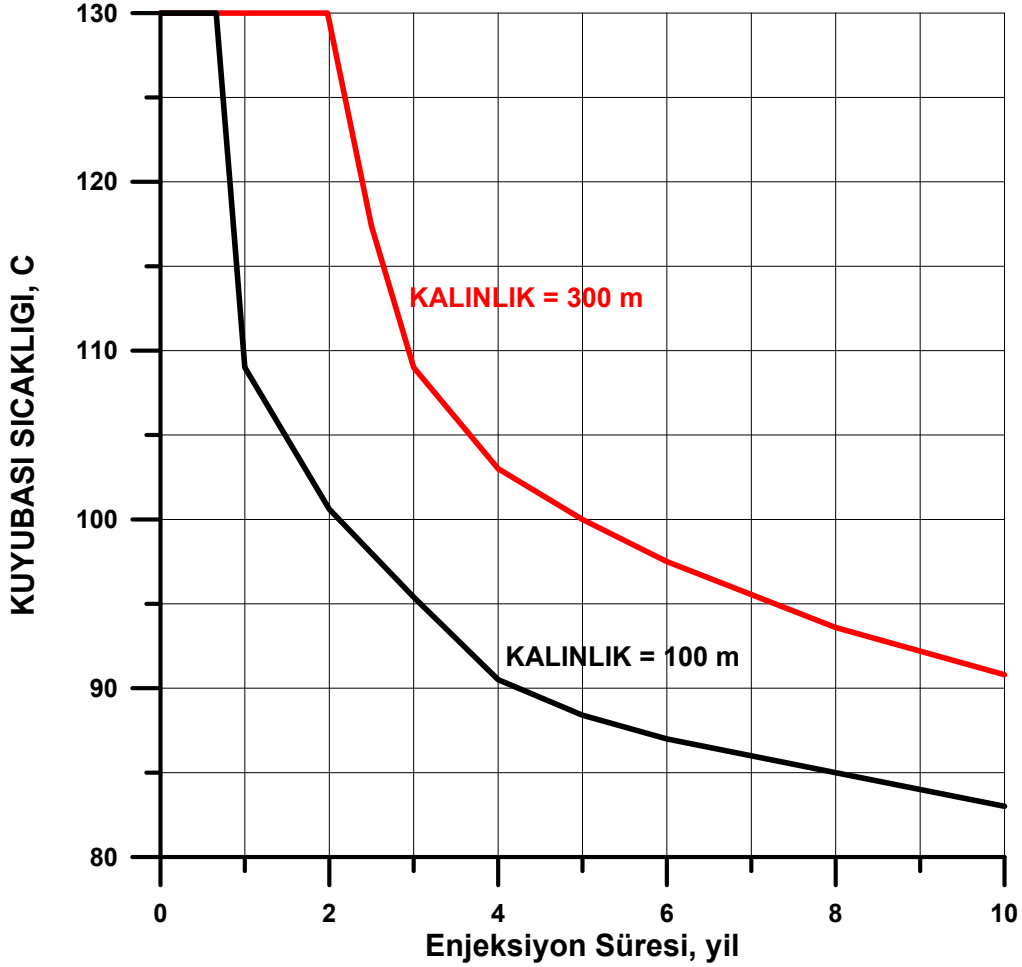


Şekil 8. Suyun 8 ay boyunca sabit debide basılması durumunda ısı kirlenmenin oluşmaması için gerekli güvenilir aralığın formasyon kalınlığı ve enjeksiyon debisiyle ilişkisi.

KUYUBAŞI ÜRETİM SICAKLIĞININ ENJEKSİYON SÜRESİ İLE DEĞİŞİMİ (ÜRETİM-ENJEKSİYON KUYU ÇİFTİ MODELİ)

Varsayımlar:

- 1) 130°C rezervuara 60°C'da su basılmaktadır.
- 2) Su sabit debide (=108 m³ /st) basılmaktadır.
- 3) Enjeksiyon kuyusundan basılan debi ile üretim kuyusu debisi aynıdır.
- 4) Rezervuar rezervuar gözenekliliği % 5'tir.
- 5) Enjeksiyon ve üretim kuyuları aralığı 100 m'dir.



Şekil 9. Enjeksiyon ve Üretim kuyuları arasında 100 m aralık bulunması ve suyun 108 m³/st debide basılması durumunda kuyubaşı üretim sıcaklığının enjeksiyon süresi ile değişimi.

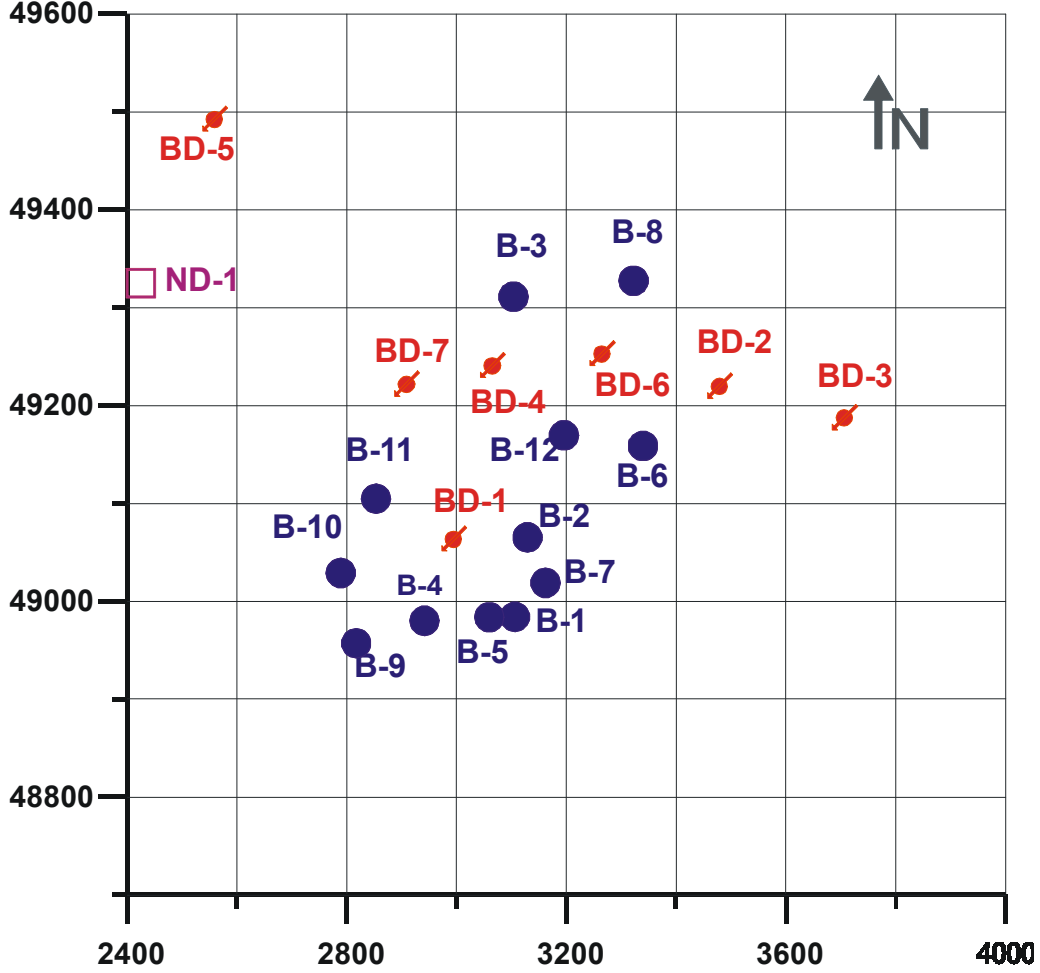
6. TÜRKİYE'DE SAHA UYGULAMALARI

6.1. Balçova-Narlidere B-9 Kuyusundan Tekrar-Basma Uygulaması

İzmir'deki Balçova-Narlidere jeotermal sahası, ülkemizdeki en gelişmiş merkezi ısıtma sistemine enerji sağlamakta kullanılmaktadır. Sahada 8 derin ve 12 sığ kuyu vardır. Kuyu yerleşimleri Şekil 10'da gösterilmektedir.

2002 yılı sonuna kadar derin kuyular genelde üretim amacıyla ve siğ kuyular ise tekrar-basma amacıyla kullanılıyordu. Sahada en siğ kuyu olan 48.5 m derinlikteki B-9 kuyusundan tekrar-basma yapıyordu.

BALÇOVA-NARLIDERE JEOTERMAL SAHASINDA SIĞ VE DERİN KUYULARIN YERLEŞİMLERİ

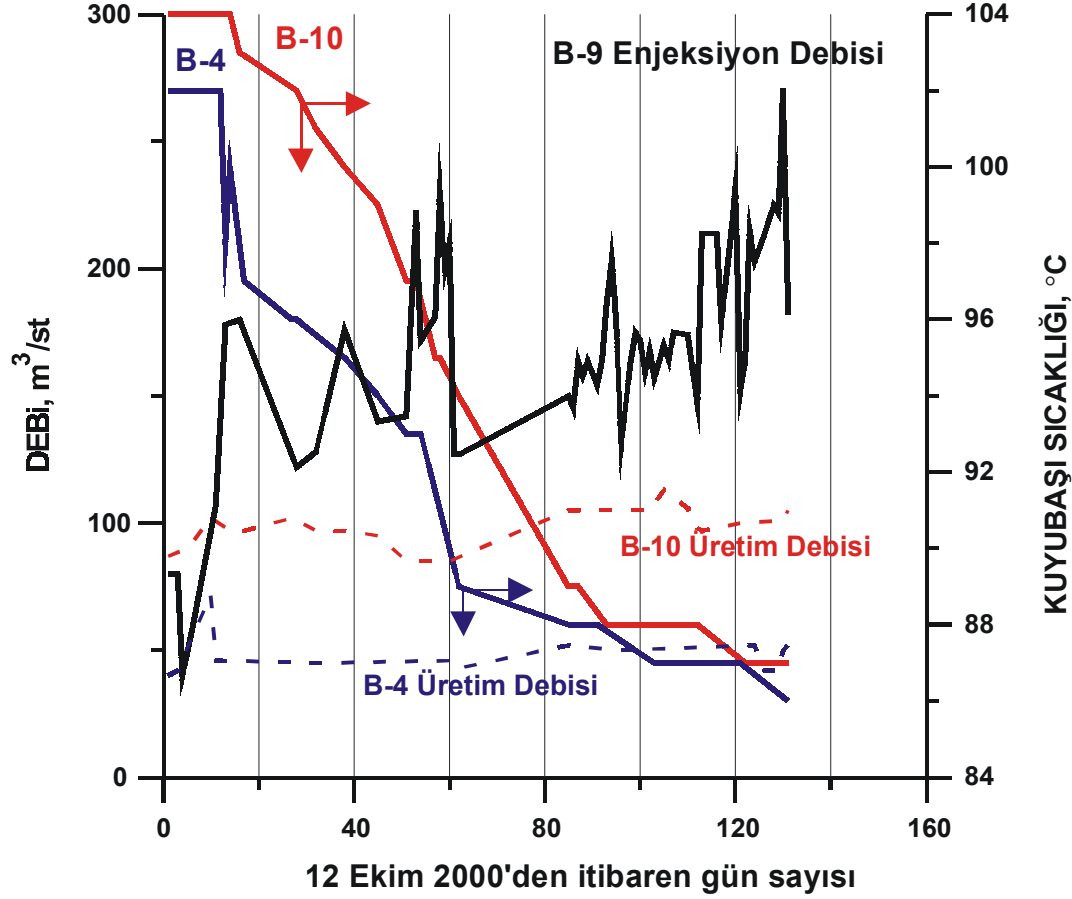


Şekil 10. Balçova-Narlidere sahasında kuyuların yerleşimleri.

Şekil 11, 12 Ekim 2000 tarihinden itibaren 18 Şubat 2001 tarihine kadar olan dönemde B-9 kuyusundan yapılan enjeksiyon debisinin ve ayrıca B-4 ve B-10 kuyularından yapılan üretim debisinin ve üretimde ölçülen kuyubaşı sıcaklıklarının zamanla değişimini vermektedir. Üretim kuyularının sıcaklık değerleri 12 Ekim 2000 tarihinden başlayarak ölçülmüştür.

B-9 kuyusundan enjeksiyon debisi dönem sonunda 225-250 m³/st değerine kadar yükselmekle beraber dönem ortalaması 150-175 m³/st civarındadır. Dönem içinde B-4 üretim debisi 40-60 m³/st arasında, B-10 üretim debisi ise ortalama 100 m³/st olarak gerçekleşmiştir. 12 Ekim 2000 tarihli ilk kuyubaşı üretimi sıcaklık ölçümleri, B-4 için 102 °C olarak ve B-10 için 104 °C olarak kaydedilmiştir. Her iki kuyuda da söz konusu sıcaklık değerleri ilk 14-15 gün içinde sabit kalmış ve daha sonra hızla düşmeye başlamıştır. 18 Şubat 2001 tarihli sıcaklık ölçümleri B-4 için 86 °C ve B-10 için 87 °C olarak gerçekleşmiştir.

12 EKİM 2000'DEN İTİBAREN B-9 KUYUSU ENJEKSİYON DEBİSİ ve B-4 İLE B-10 KUYULARININ ÜRETİM SICAKLIKLARININ DEĞİŞİMİ



Şekil 11. 12 Ekim 200'den itibaren B-9 kuyusu enjeksiyon debisi ve B-4 ile B-10 kuyularının üretim sıcaklıklarının değişimi.

Şekil 11'deki veriler değerlendirildiğinde üç önemli sonuç oluşmaktadır:

- 1) B-9'dan yapılan enjeksiyon, B-4 ve B-10'dan yapılan toplam üretime yaklaşık olarak eşittir. B-9'a en yakın kuyular B-4 ve B-10 olduğuna göre bu sonuç normal ve beklenen bir sonuçtur.
- 2) B-4 ve B-10 kuyuları B-9 enjeksiyon kuyusuna yaklaşık olarak aynı uzaklıktadır. B-9'dan basılan 60 °C'daki soğuk suyun B-4 ve B-9'a varış süreleri yaklaşık olarak 12-14 gün kadardır. Bu süre ısıl kirlenmenin başladığı, bir başka deyişle üretilen su sıcaklığının basılan soğuk su sıcaklığından etkilenmeye başladığı süre olarak tanımlanabilir.
- 3) B-4 ve B-10'da ısıl kirlenmenin başlamasından itibaren kuyubaşı üretim sıcaklığı hızla azalmaktadır.

Yukarıda sıralanan gözlemler ve gerçekler göz önüne alınarak bir modelleme çalışması yapılarak B-9'dan yapılan enjeksiyonun B-4 kuyusundan yapılan üretim sıcaklığını nasıl etkilediği incelendi.

İnceleme çalışmasında iki ayrı model (Model 1 ve Model 2) kullanıldı. Her iki modelde de homojen ortamda çevrel akış varsayımı yapıldı. Model 1'de Denklem 4 kullanılarak ve B-4'ten üretim yapılmadığı varsayılarak, B-9'dan yapılan enjeksiyonun B-9'tan yaklaşık 114 m uzaklıkta bulunan B-4 üretim kuyusu noktasında sıcaklığı nasıl etkilediği incelendi (Bodvarsson, 1969). Model 2'de ise Şekil 4'te verilen çözüm kullanılarak ve B-9 ile B-4'ün bir enjeksiyon-üretim kuyusu çifti oluşturduğu varsayılarak ve enjeksiyon debisi ile üretim debisi aynı alınarak B-9'dan yapılan enjeksiyonun B-4

kuyusundaki üretim sıcaklığını nasıl etkilediği araştırıldı (Gringarten ve Sauty, 1975). Her iki modelleme çalışmasında da kuyular arasındaki akışın yatay konumda olduğu, enjeksiyon sıcaklığının 60 °C ve orijinal rezervuar sıcaklığının 102 °C olduğu varsayımı yapıldı.

Modelleme çalışmasında ısıl cephenin B-9 kuyusundan B-4 kuyusuna 12 günde ulaştığı gözönüne alınarak, öncelikle B-9 kuyusu ile B-4 kuyusu arasında oluşan su akışının Model 1'de 1 m kalınlıklı bir formasyon içinde ve Model 2'de ise 2 m kalınlıklı bir formasyon içinde yer aldığı belirlendi. Daha sonra bulunan formasyon kalınlık değerleri modelleme çalışmasında veri olarak kullanılarak, B-4 kuyusu üretim sıcaklığındaki zamanla olan değişme bulundu.

Modelleme çalışması sonuçları Şekil 12'de gösterilmektedir. Model 2, B-4'ten yapılan üretimin 50 m³/st (Model 2.1) ve 60 m³/st (Model 2.2) değerleri için ayrı ayrı uygulandı ve elde edilen sonuçlar Şekil 12'de verilmektedir.

Şekil 12'de verilen modelleme sonuçları, Model 2'nin B-9 ile B-4 kuyuları arasındaki enjeksiyonun üretimi etkilemesi olayını oldukça iyi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, B-9 ile B-4'ün bir enjeksiyon-üretim çifti şeklinde hareket ettiğini göstermesi yine normal ve beklenen bir sonuçtur. B-4 kuyusu üretim kuyusu olduğu için, B-4 kuyusunun üretim sıcaklığının B-4 kuyusuna B-9 kuyusundan varan soğuk akışkan sıcaklığı ile B-4'ün kuzeyindeki bölgeden üretilen sıcak akışkan sıcaklığının bir ortalaması şeklinde oluşması normaldir. Eğer B-4 kuyusundan üretim yapılmıyorsa, Model 1 sonuçları geçerlilik kazanacak ve dolayısıyla üretim sıcaklığı Model 1'den elde edildiği gibi daha düşük olacaktır.

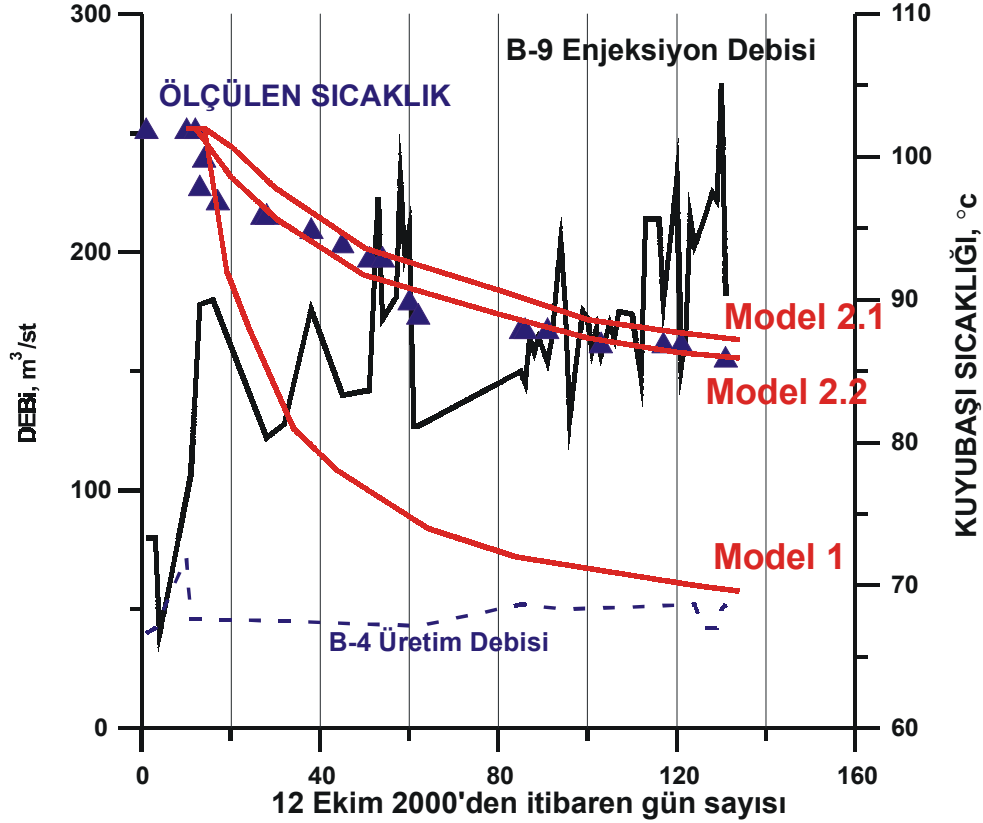
Modelleme çalışması, B-9'dan yapılan enjeksiyonun jeotermal rezervuarlarda uygulanan tekrar-basma işleminde beklenen yararları ve sonuçları oluşturması açısından verimli bir işlem olmadığı sonucunu vermektedir. B-9'dan yapılan tekrar-basma sıgı sistemdeki üretim kuyularında soğuma etkisi yaratmaktadır. Bu nedenle, B-9'da yapılan uygulama, Balçova-Narlıdere sahasında 50-150 m sıgı derinlik aralığındaki verimsiz bir tekrar-basma uygulaması olarak özetlenebilir.

B-9'da enjeksiyona başlandıktan 12 gün sonra ısıl cephenin 114 m uzaklıktaki B-4 kuyusuna varması ve daha sonra üretim sıcaklığının hızla düşmesi, formasyonda oldukça hızlı bir akış dolayısıyla basılan soğuk akışkana formasyondan ısı geçişinin zayıflığının ve enjeksiyon işleminin verimsizliğinin en önemli kanıtıdır. Aksoy (2001), B-9'dan basılan izleyicilerin 37-49 st'de B-4'de ulaştığını saha testiyle belirlemiştir. İzleyici varış süresi ortalama 43 st alınır ve ısıl cepheninde 12 günde B-4'e ulaştığı bilindiğinden, Denklem 3 yardımıyla formasyon gözenekliliği %8.5 olarak belirlenmektedir.

Tekrar-basma işleminin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli iki özellik; ısıl cephenin üretim kuyusuna geç varmasını sağlayacak ve dolayısıyla rezervuardaki akışkana basınç desteği verme özelliği ve hareket ederken sıcak kayaktan ısı alıp, alınan ısıyı üretim kuyusuna taşıyacak enjeksiyon akışkanının rezervuarda mümkün olduğunca uzun süre kalması özelliğidir. Rezervuarda kalış süresinin uzunluğu ve buna bağlı olarak ısıl cephenin üretim kuyusuna geç varışı, tekrar-basma işleminin verimliliğini artırır. B-9 uygulamasında ise idealde olması gerekenin tam tersi gerçekleşmektedir. B-9'dan basılan akışkanın 2-3 gün gibi kısa bir sürede B-4 üretim kuyusuna varması hiç arzu edilmeyen ve kesinlikle verimsizliğe neden olan bir gerçektir.

B-9'dan yapılan tekrar-basma uygulamasının verimsizliğinin ve başarısızlığının anlaşılması üzerine, sahayı işleten Balçova Jeotermal A.Ş. yönetimi uygulamanın derin kuyulara yapılması kararı doğrultusunda, sahada 2002 yılında delinen BD-8 kuyusunda tekrar-basma uygulaması başlatıldı. Sahada alınan ilk sonuçlar, yeni uygulamanın başarıyla sürdürüldüğünü göstermektedir. Söz konusu yeni uygulama, ülkemizde örnek teşkil edebilecek bir uygulama olmaya adaydır.

**12 EKİM 2000'DEN İTİBAREN B-9 KUYUSU ENJEKSİYON DEBİSİ
ve B-4 KUYUSUNUN ÜRETİM SICAKLIĞININ DEĞİŞİMİ**
(Enjeksiyon Sıcaklığı=60 °C, Orijinal Rezervuar Sıcaklığı=102 °C
B-9 - B-4 Aralığı=114 m)



- Model 1.** B-4'ten üretim yok varsayılırsa
(Kalınlık=1 m, Enjeksiyon Debisi=150 m³/st).
- Model 2.1** B-9 ile B-4 bir kuyu çifti ("Doublet") varsayılırsa
(Kalınlık=1.7 m, Enjeksiyon Debisi=Üretim Debisi=50 m³/st).
- Model 2.2** B-9 ile B-4 bir kuyu çifti ("Doublet") varsayılırsa
(Kalınlık=2.1 m, Enjeksiyon Debisi=Üretim Debisi=60 m³/st).

Şekil 12. Modelleme sonuçları.

6.2. Kızıldere Jeotermal Rezervuarı İçin Tekrar-Basma Değerlendirmesi

6.2.1. Tekrar-Basma Uygulamasında Enerji ve Akışkan Dengeleri

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

Örnek jeotermal rezervuarı olarak ülkemizin en gelişmiş ve özelliklerinin iyi bilindiği Kızıldere sahasını alalım. Bu sahada kW-st elektrik üretimi için gerekli buhar kütlesi 11 kg/kW-st alınmakta, rezervuardan 200 °C sıcaklıkta 100 kg/kW-st debide ve 236.3 kcal/kg entalpide akışkan üretildiği varsayılmaktadır.

(Satman v.ö., 1997) Bu durumda, tekrar-basma uygulaması durumunda 89 kg/kW-st atık su rezervuara geri verilirken, tekrar-basma uygulaması olmaması durumunda ise 89 kg/kW-st su atık su olarak yüzeyde harcanmaktadır. Üretilen ve fakat elektrik üretiminde kullanılmayan suyun 130 °C'da rezervuara tekrar basıldığını düşünelim. Ayrıca yüzeyde kullanılan miktar kadar suyun beslenme yoluyla karşılandığını varsayalım.

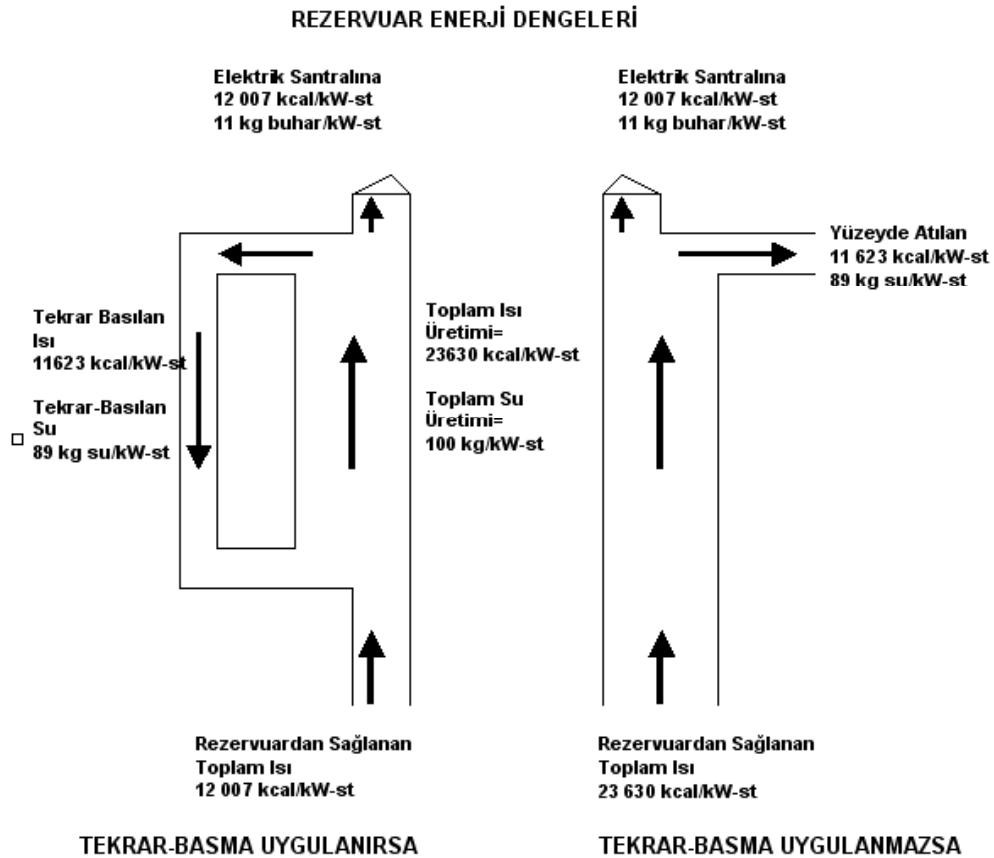
Şekil 13 tekrar-basma uygulanması olması durumunda ve olmaması durumunda rezervuarda enerji ve akışkan dengelerini şematik olarak göstermektedir.

Rezervuar için su ve enerji dengeleri birim kW-st elektrik enerjisi üretimi cinsinden incelendiğinde; sahada birim kW-st elektrik elde edilmesi için gerekli net su ve ısı üretimi tekrar-basma işleminin uygulanmaması durumunda uygulanması durumuna kıyasla 9.1 ve 2.0 kat daha yüksektir.

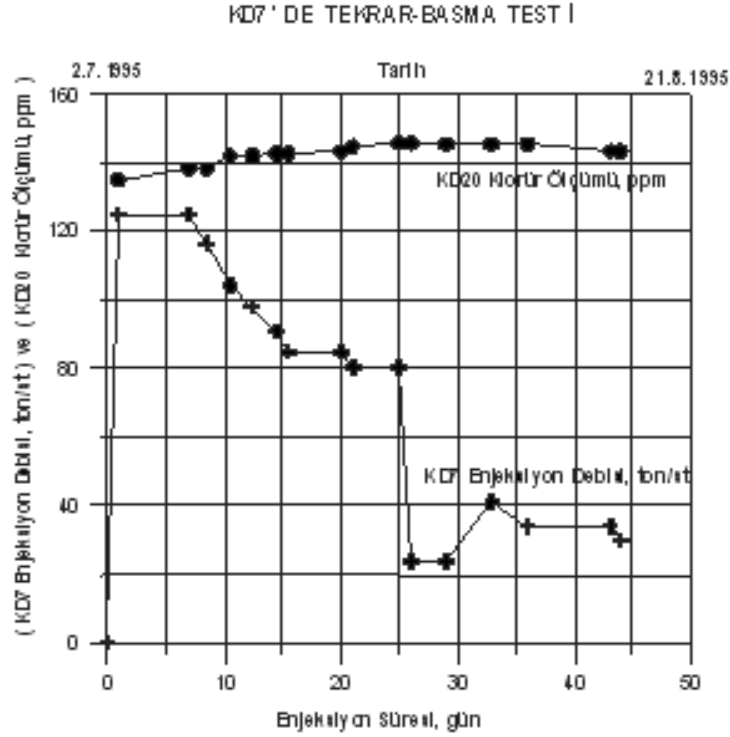
Tekrar-basma işlemiyle elektrik üretiminden sonra kalan yoğunlaşmış buhar ve kullanılmayan jeotermal su rezervuara basılır. Böylece, rezervuarın doğal yoldan beslenmesi için gereksinim azalır, ve hatta yüzeyde kullanılmayan tüm su tekrar basılırsa bu gereksinim hemen hemen ortadan kalkar.

Tekrar-basma uygulanmaması durumunda buhar ayrışımından sonra kalan ısı yeryüzünde çevreye verilir. Kuyulardan üretilen toplam ısının yaklaşık %50 kadarı olan bu ısı, tekrar-basma uygulanmasıyla rezervuara döndürülmüş olur. Bu şekilde rezervuar enerjisini önemli oranda korur ve sahadan yapılacak yararlı enerjinin üretim potansiyelini artırır.

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



Şekil 13. 10 MW elektrik santrali için tekrar-basma uygulanırsa (solda) ve uygulanmayipta atık su yüzeyde harcanırsa (sağda) rezervuarda enerji dengeleri. (Satman v.ö., 1997)



Şekil 15. Tekrar-basma süresince KD20 kuyusundan üretilen klorür derişiminin değişimi

Klorür derişimindeki artış KD7'den KD20'ye doğru ilerleyen hidrolik (kimyasal) cephenin hareketinden dolaydır. Yapılan basit kütle denge hesapları basılan suyun yaklaşık %40 kadarının KD20'ye ulaştığını göstermektedir. Hidrolik cephenin KD20'ye varışı yaklaşık 25 gün alınır ve formasyon gözenekliliği 0.10 varsayılırsa, test sabit enjeksiyon debisinde sürdürülseydi, Denklem 3'ten hesaplanabileceği gibi, 167 günlük enjeksiyon sırasında ısıl cephenin KD20'ye varması ve dolayısıyla üretilen suyun sıcaklığında düşüşün gerçekleşmesi beklenirdi.

KD20 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.

SONUÇLAR

Bu bildiriye, tekrar-basma uygulanması incelenmektedir. Bildiriye 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.

Jeotermal sahanın işletilmesinde, üretim ve enjeksiyonun birlikte düşünülmesi, planlanması, tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir.

Tekrar-basma uygulaması, bu bildiriye ayrıntılı olarak incelendiği gibi, jeotermal sahaların uygun ve sürdürülebilir işletilmesinin olmazsa olmaz koşullarından birisidir. Ülkemizdeki jeotermal saha işletiminde genelde ihmal edilen tekrar-basma uygulaması bu bildiriye vurgulanan yararlarından dolayı, kesinlikle tüm jeotermal sahaların tasarımında önemle yerelmalıdır.

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] LAUWERIER, H.A., "The Transport of Heat in an Oil Layer Caused by Injection of Hot Fluid", Applied Scientific Reserach (1955) A5, 145-150.
- [2] BODVARSSON, G., "On the Temperature of Water Flowing Through Fractures", J. Geoph. Res. (April 15, 1969), 74, No. 8, 1987.
- [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] SATMAN, A., Jeotermal Rezervuarlarına Soğuk Su Enjeksiyonu İle Enerji Üretiminin İncelenmesi ve Türkiye'de Uygulanabilirliği, Proje MAG-593, TÜBİTAK, Ankara, Nisan 1983.
- [5] SATMAN, A., ZOLOTUKHIN, A.B., SOLIMAN, M.Y., "Application of the Time-Dependent Overall Heat Transfer Coefficient to Heat Transfer Problems in Porous Media", Soc. Pet. Eng. Jour., Febr. 1984, 107-112.
- [6] SATMAN, A., "Solutions of Heat and Fluid Flow Problems in Naturally Fractured Reservoirs: Part 1- Heat Flow Problems", SPE Production Engineering, 463-466, Nov. 1988.
- [7] SATMAN, A., Reinjection; Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Edited by H.J. Ramey, Stanford University, 1981.
- [8] 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.
- [9] BODVARSSON, G.S., TSANG, C.F., Injection and Thermal Breakthrough in Fractured Geothermal Reservoirs, Report No. LBL-12698, LBL-U. of Calif., Berkeley, May 1981.
- [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, Şubat 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] AKSOY, N., Balçova-Narlıdere Jeotermal Sisteminin Doğal ve Yapay İzleyiciler İle İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), İzmir, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman SATMAN

İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği A.B.D.'deki Stanford Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölümü'nden MS ve Doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde Assistant Profesör olarak çalıştıktan sonra 1980 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümünde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan'da KFUPM-Research Institute'te çalıştı. Halen İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. İlgili alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliği ve üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.