



Afyon Ömer-Gecek jeotermal sisteminde reenjeksiyon uygulamalarının rezervuar sıcaklığı üzerine etkilerinin modellenmesi

Modeling the influence of re-injection application on reservoir temperature in Afyon Ömer-Gecek geothermal system

Berrin AKAN

Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM),
06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Jeotermal alanlarda, termal suyun kullanımdan sonra ne şekilde ortamdaki uzaklaştırılacağı önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde sıklıkla uygulanan yöntem kullanımdan dönen termal suyun yüzey sularına verilmesi yönündedir. Şehir ısıtımının yapıldığı Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında kullanımdan dönen termal su, halen Akarçay'a verilmekte ve bu durum yüzey sularında kalite değişikliğine neden olmaktadır. Bu tip çevresel etkiler nedeni ile kullanılmış termal suyun jeotermal sisteme reenjeksiyonu en uygun seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Termal suyun sisteme reenjeksiyonu, aynı zamanda rezervuar basıncının korunması açısından da faydalı olmaktadır. Ancak reenjeksiyon kuyularının lokasyonu ve derinliğinin belirlenmesi de önemli birer parametredir. Bu çalışma kapsamında, Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında kullanımdan dönen termal suyun reenjeksiyon yoluyla yeniden rezervuara verilmesi durumunda jeotermal sistemin ne tür bir davranış göstereceğinin belirlenmesi amacıyla, HST3D kullanılarak farklı derinliklerdeki kuyularda reenjeksiyon uygulamaları yapılmıştır. Bu amaçla, model aracılığı ile bölgede 2000 yılında MTA tarafından yapılan injektivite testleri sonucu reenjeksiyon için uygun olduğu belirlenen AF-4 ve AF-22 numaralı kuyular ile Reen adı verilen hayali bir kuyuda 700-800 m derinliğe reenjeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelde elde edilen sonuçlara göre, 700-800 m derinliğe 20 yıl süreyle yapılacak reenjeksiyon işleminin, termal akifer dinamikleri üzerinde bir etkisinin olmadığı, buna karşılık sistem içerisinde soğumayı önlediği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Afyon, HST3D, jeotermal enerji, model, Ömer-Gecek, reenjeksiyon.

ABSTRACT

In geothermal fields, the removal of the used thermal water is a major problem. The most common way in our country is discharging the geothermal water in to the river. In the Afyon city, the geothermal energy is used for the heating, and discharged to the Akarçay stream after utilization, which causes quality degradation of the surface water. Due to environmental impacts, the re-injection of the used hot water back to the geothermal reservoir becomes the most appropriate method of the removal. In addition, re-injection is a good way to prevent the pressure of the reservoir. However, the selection of the location and depth of re-injection wells is also an important parameter. Thus, this study aims to estimate the consequences of the re-injection applications to the wells has different depth on the aquifer system by modeling the temperature and pressure distribution with the HST3D. In this field, re-injection test were carried out in five wells, according to the test results, AF-4 and AF-22 wells were determined to the best wells for re-injection by MTA. AF-4, AF-22 and an imaginary well named Reen (700-800 m depth) have been used for re-injection purpose in the model. The model results indicates that the re-injecting of the hot water to the depth of the 700-800 m for 20 years, has no negative effect on the thermal aquifer dynamics, on the contrary, prevents the temperature decline in the system.

Key words: Afyon, geothermal energy, HST3D, model, Ömer-Gecek, re-injection.

GİRİŞ

Jeotermal enerji, çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olması nedeniyle tüm dünyada giderek artan bir önem kazanmaktadır. Bu enerji kaynağı; elektrik üretimi, konut ve sera ısıtıcılığı ile endüstride kullanımının yanı sıra, turistik ve balneolojik olarak da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak kullanımdan dönen jeotermal suyun ortamdan ne şekilde uzaklaştırılacağı önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu suyun değerlendirilmesine ilişkin çeşitli yöntemler mevcut olup, bunlar yüzey boşalımı, suyun arıtılması ve reenjeksiyon olarak sıralanabilir. Jeotermal alanlarda kullanımdan dönen jeotermal suyun yüzey sularına verilmesi sıklıkla kullanılan bir yöntem olmakla birlikte, yüzey sularının kimyasını değiştirerek, kirliliğe neden olmaktadır. Bu yüzden dünyada bir çok jeotermal alanda kullanımdan dönen suyun yüzeye verilmesi, çevre kirliliğine yol açması nedeniyle yasaklanmış durumdadır. Bu durum gözönüne alındığında, kullanımdan dönen jeotermal suyun hem ekonomik yönden, hem de çevresel nedenlerle yeraltına verilmesi en uygun seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, kullanımdan dönen suların reenjeksiyonu jeotermal alanının geliştirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Başlangıçta reenjeksiyon, kullanımdan dönen sudan kurtulmak için kullanılan bir yöntem iken, günümüzde rezervuar basıncının korunması yönünden de önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir.

Ülkemizde yer alan önemli jeotermal alanlardan biri olan Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında jeotermal enerji yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle şehir ısıtıcılığı ve turistik amaçlı olarak jeotermal sulardan yararlanan bu bölgede, kullanımdan dönen jeotermal su Akarçay nehri-ne boşaltılmakta ve bu durum yüzey sularında kalite değişikliğine neden olmaktadır. Tezcan vd. (2002), Akarçay Havzası'nda yaptıkları çalışmada, kullanımdan dönen jeotermal suyun Akarçay Havzası'ndaki yüzey sularında meydana getirdiği kirlenici etkiye dikkat çekmişlerdir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, özellikle Br⁻, F⁻ ve As iyonlarının, termal suların atıklarının Akarçay'a katılma noktasına kadar çok büyük değerler almadığı, termal atık katkısından sonra ise, akım yolu boyunca yüksek konsantrasyonda bulunduğu saptanmıştır. Akarçay'ın bu atıkları doğrudan Eber Gölü'ne

taşınması ve Eber Gölü'nün çıkışının kapalı olması nedeniyle, uzun dönemde Eber Gölü'nde bu iyonların konsantrasyonunun yükselmesinin söz konusu olabileceği belirtilmiştir.

MTA tarafından 2000 yılında Afyon Ömer-Gecek sahasında üretim amaçlı kullanılmayan AF-1, R-260, AF-3, AF-4 ve AF-22 numaralı kuyularda reenjeksiyon testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda AF-4 ile AF-22 numaralı kuyuların yüksek su alma kapasitesine sahip olduğu ve reenjeksiyon kuyusu olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir (Tamgaç vd., 2000). Bu çalışma kapsamında, Kipp (1987) tarafından geliştirilen HST3D (The Heat and Solute Transport Program) model programı kullanılarak, Ömer-Gecek jeotermal alanında farklı derinlikteki kuyularla reenjeksiyon yapılması sonucunda termal akiferdeki basınç ve sıcaklık koşullarında ne tür değişikliklerin meydana geleceği ve kullanımdan dönen jeotermal suyun hangi derinliğe verilmesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir.

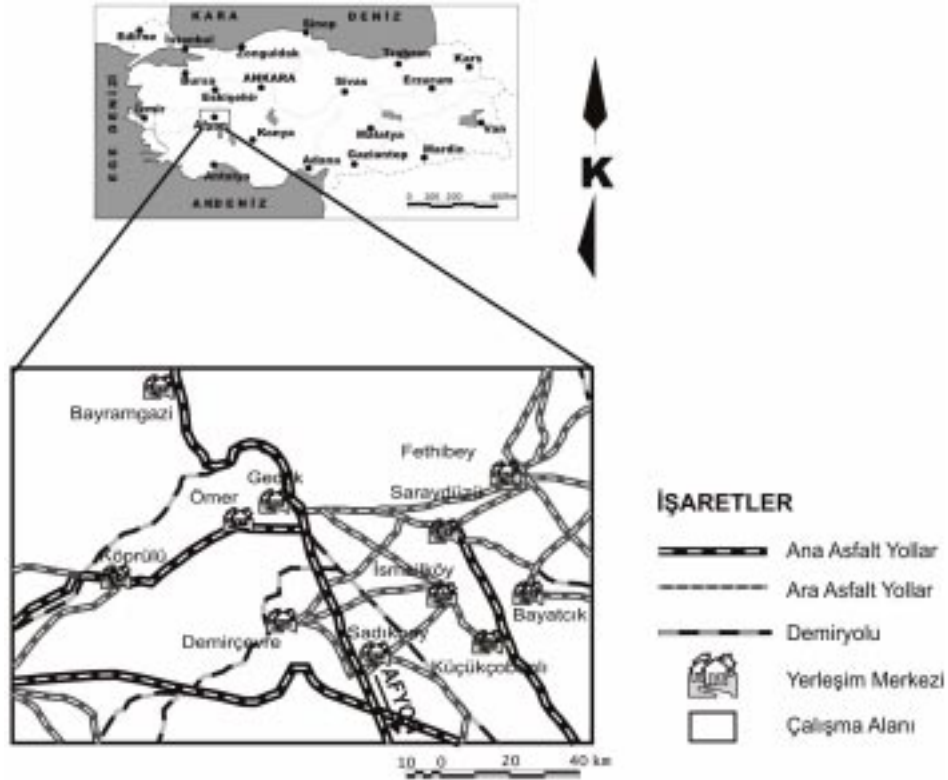
İNCELEME ALANININ TANITIMI

Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarından biri olan Ömer-Gecek jeotermal alanı Afyon-Kütahya karayolu üzerinde Afyon'a 15 km uzaklıktadır. Yaklaşık 16 km²'lik bir alan kaplayan inceleme alanı, Afyon K24-b3 paftasında yer almaktadır. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmektedir. İnceleme alanında yer alan yerleşim merkezleri; kuzeyde Bayramgazi, batıda Köprülü, güneyde Demirçevre, Sadıkbey, doğuda Saraydüzü, Fethibey, İsmailköy, merkezde Ömer ve Gecek köyleridir. İnceleme alanında başlıca il merkezi Afyon olup, 1997 nüfus sayımına göre il merkezinde toplam nüfus 181650'dir. İl ekonomisine en önemli katkıyı ise zengin mermer ocakları, jeotermal kaynaklar ve turizm sağlamaktadır.

Jeoloji

İnceleme alanında; Erişen (1972), Karamanderesi (1972), Tatlı (1973), Metin vd. (1987) ve Erkan vd. (1996) tarafından ayrıntılı jeolojik incelemeler yapılmıştır. Bu bölümde, Afyon Ömer-Gecek ve yakın çevresinin jeolojisi bu çalışmalardan yararlanılarak özetlenmiştir. İnceleme alanına ait jeoloji haritası Şekil 2'de sunulmuştur.

Afyon Ömer-Gecek alanında Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfite temeli oluşturmaktadır. Ge-



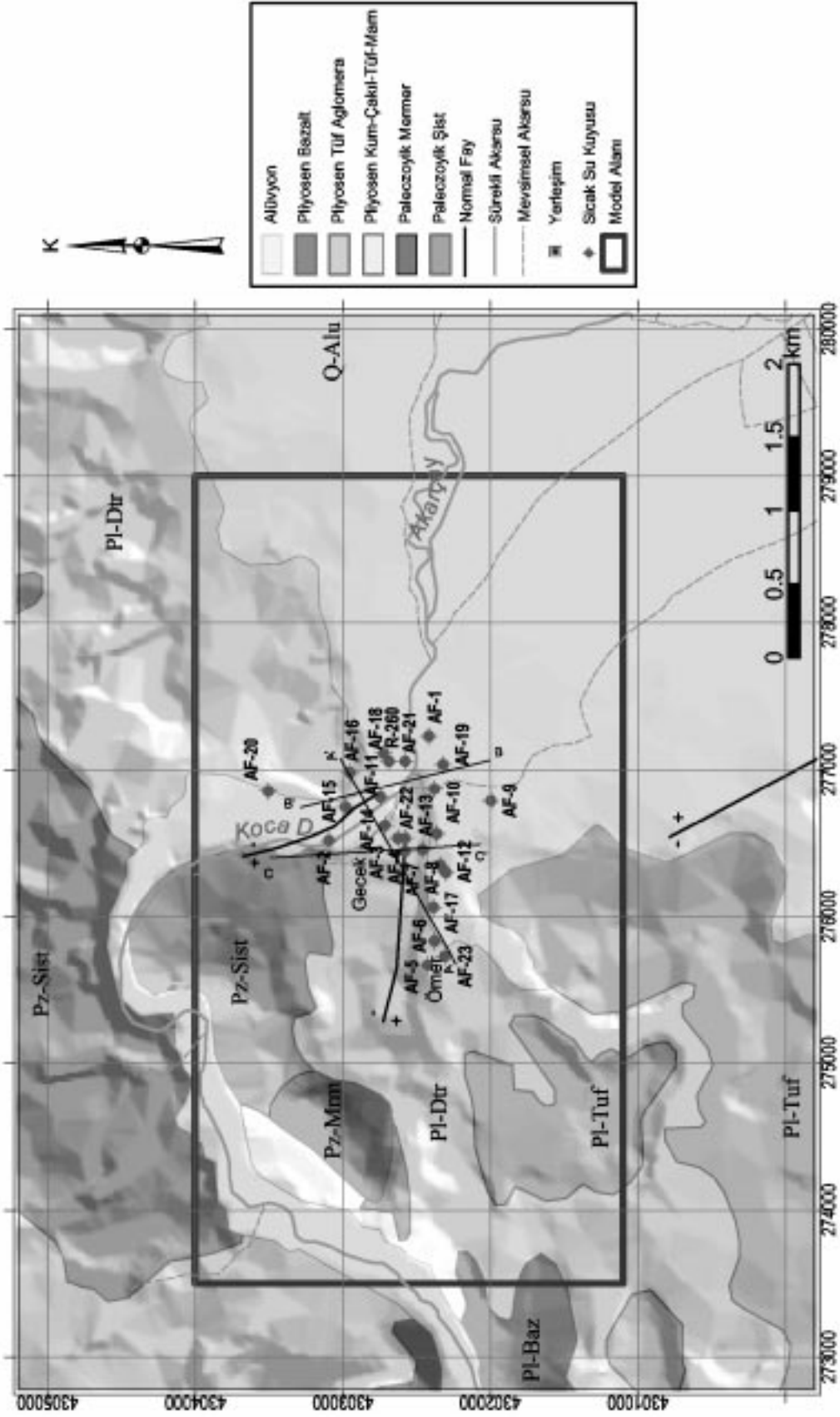
Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.
Figure 1. Location map of the study area.

nellikle kahve, boz, yeşil, kıvrımcıklı, granoblastik dokulu, şisti yapılı ve görünüşte ileri derecede metamorfik kayaç izlenimi veren bu metamorfikler, genel olarak, albit-klorit-muskovit-biotit-kuvars şistlerden oluşmuştur. Ayrıca bu şistler içerisinde yer yer büyük mercer ve bantlar halinde metakonglomera, metakumtaşı, mermer ve kalkışistler yer almaktadır. İnceleme alanında geniş bir alan kaplayan Senozoyik yaşlı oluşuklar genel olarak Neojen yaşlı birimler ile temsil edilmekte, Neojen çökelleri inceleme alanının tamamında, Paleozoyik kayaçlar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir. Miyosen yaşlı birimler, koyu, kırmızı, kirli sarı, okside, turuncu, kalın ve kötü katmanlanmalı, konglomera-kumtaşı-silttaşı ve kiltası araldanmasından oluşmaktadır. İnceleme alanında Pliyosen, gölsel ve volkanik kayaçlar ile temsil edilmektedir. Gölsel çökeller alttan üste doğru birbiriyle geçişli 4 farklı birimden oluşmaktadır. En altta ince-orta ve kalın katmanlanmalı konglomera, kumtaşı, tüf, tüfit ara katkılı marn üyesi bulunmaktadır. Bu birimin üzerine, silis arabantlı killi kireçtaşı üyesi gelmektedir. Kireçtaşlarının üzerinde kalın tabaka-

lanmalı, karbonat çakıllı konglomera üyesi ve en üstte belirsiz tabakalanmalı (üst) marn üyesi bulunmaktadır. Pliyosen çökellerinin alt dokanağı Miyosen çökelleri üzerinde uyumsuz olarak izlenmektedir. Üst dokanağı ise, bazalt ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür. Pliyosen yaşlı birimlerin kalınlığı genel olarak değişken olup, 25-350 m arasındadır. İnceleme alanının D ve GD'sunda geniş alanlar kaplayan Kuvaterner yaşlı alüvyon ise, akarsu yataklarında biriken kum, çakıl, mil türü tutturulmamış güncel çökellerden oluşmaktadır.

Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sisteminin Kavramsal Modeli

Afyon Ömer-Gecek bölgesinde sıcak suların akifer kayacını Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfikleri'ne ait mermer ve şistler ile Pliyosen yaşlı bazaltlar oluşturmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında kuyuların büyük bir bölümünün şistlerden su aldığı göz önüne alınarak, Paleozoyik yaşlı şistler modellenmiştir. İnceleme alanında açılan kuyularda şistlerin alt sınırına ula-



Şekil 2. Afyon Ömer-Gecek ve yakın çevresine ait jeolojik haritası (Tezcan vd., 2002'den basitleştirilerek alınmıştır).
Figure 2. Geological map of Afyon Ömer-Gecek field (simplified from Tezcan et al., 2002).

şilamamış olmasına rağmen yaklaşık kalınlıklarının 2000 m civarında olduğu tahmin edilmektedir. Permeabilite değeri düşük ($k=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$) olan ve oldukça kırıklı ve çatlaklı bir yapı gösteren bu birim eklem, kırık ve çatlakları içinde sıcak yeraltısuyu bulundurmaktadır.

Sıcak su akiferinin örtü kayacını ise, Neojen yaşlı birimler (Miyosen yaşlı konglomera ve marn üyesi ile Pliyosen yaşlı marn, konglomera, kireçtaşı ve üst marn üyesi) oluşturmaktadır. Bu birimlerin kalınlığı değişkenlik göstermekte ve inceleme alanında rezervuar kayacın derinliğinin batıdan doğuya doğru artmasına paralel olarak, Neojen örtünün kalınlığı da artış göstermektedir.

İnceleme alanının doğu kesiminde KB-GD yönlü büyük bir fay yer almakta ve bu fay nedeniyle meydana gelen kırılma sonucunda sıcak su akiferinin derinliği ve buna bağlı olarak da örtü kalınlığı artmakta ve basamaklı bir yapı oluşmaktadır. Soğuk yeraltısuyu için bir akifer özelliği gösteren Neojen yaşlı birimlerin, kalın bir kil-milmarn serisiyle başlaması ve Paleozoyik birimlerin hidrolik iletkenliklerinin çok düşük olması, Neojen akiferi ile sıcak su akiferi arasında yaygın bir ilişkinin olmasını engellemektedir.

Bölgede özellikle Afyon civarında, tektonik faaliyetlere bağlı olarak Miyosen'de başlayan ve Pliyosen boyunca devam eden etkin bir volkanizmanın ürünleri geniş bir alan kaplamaktadır. Volkanik etkinliğin son safhasını ise bazalt akıntıları meydana getirmektedir (Mutlu, 1996). Bu volkanik kayalar oluşturan magma ceplerinin jeotermal sistemin ısı kaynağını oluşturduğu düşünülmektedir. GSJ-MTA (1992), bölgede yaptıkları çalışmada bazaltlardan oluşan volkanik kayaların içinde agglutinate oluşumlarına rastlamışlar ve bu oluşumların varlığını o bölgenin bazaltik erüpsiyonun merkezine çok yakın olması şeklinde açıklamışlardır.

Sıcak suların beslenmesi, yüksek kısımlarda yüzeylenen Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfite, bu birimin örtülü olduğu kısımlarda ise örtü kayacın geçirimli kısımları aracılığı ile dolaylı olarak ve fay hatları boyunca gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, beslenme bölgesinde yer alan Paleozoyik yaşlı metamorfite üzerine düşen yağış, derin bir dolaşım yolunu izleyerek, kırık ve çatlaklar boyunca derinlere süzülmekte ve je-

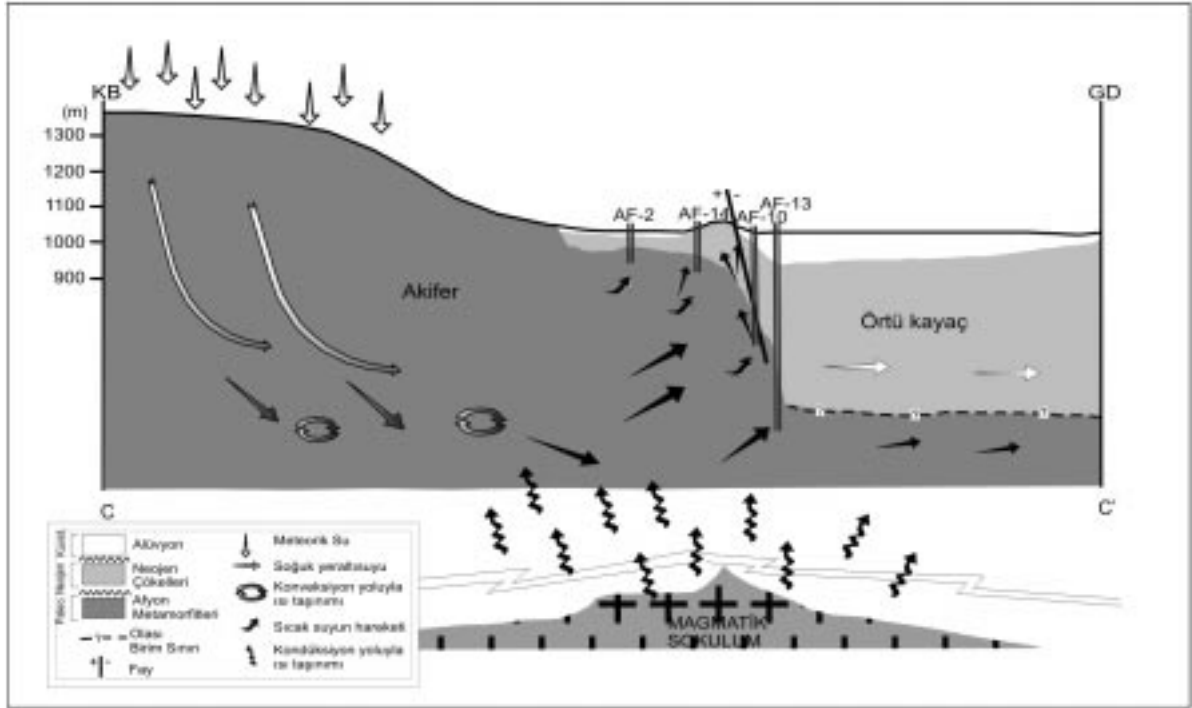
otermal gradyanın da etkisiyle bir miktar sıcaklık kazanmaktadır. Derinlere inen meteorik kökenli suların, magma ceplerinden kaynaklanan ısı akısının etkisiyle sıcaklığı artmaktadır. Bu sular, sıcak ve soğuk sular arasındaki yoğunluk farkından da kaynaklanan basınç ve bölgede yer alan faylar aracılığı ile yükselerek yüzeye ulaşmaktadır (Şekil 3). Şimşek (1993) ve Ercan vd. (1994) de, bölgede yaptıkları incelemeler sonucunda Afyon-Ömer-Gecek jeotermal alanında yer alan sıcak suların meteorik kökenli olduğunu bildirmiştir. Mutlu (1996) ise, Ömer-Gecek'teki sıcak suların yüksek Cl içeriğinin, bölgedeki suların derin dolaşım olmasına ve rezervuarda uzun bir geçiş dönemine sahip bulunmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

Afyon Ömer-Gecek Alanında Sıcak Su Kullanımı

Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında yer alan sıcak ve mineralli su kaynakları, termal turizme yönelik olarak 3 adet kaplıca ile 33 adet termal motelin ısıtılmasında ve termal olimpik bir havuz sıcak su verilmesinde kullanılmaktadır (Yılmaz, 1999). Sahada, MTA başta olmak üzere, çeşitli kuruluşlar tarafından açılmış çok sayıda sıcak su sondajı bulunmaktadır. Bunların sıcaklıkları 48-98 °C, debileri ise 0.4-100 l/s arasında değişmektedir. Bölgede sondaj çalışmaları 1971 yılında başlamıştır. MTA tarafından Afyon'da çeşitli tarihlerde toplam 24 adet kuyu açılmıştır. Bu kuyulara ait kuyu logları Şekil 4'de yer almaktadır. Bölgedeki kuyuların 12 tanesi (AF-1, AF-2, AF-3, AF-5, AF-6, AF-7, AF-8, AF-10, AF-12, AF-15, AF-18 ve AF-19) zaman içinde çeşitli nedenlerle kullanım dışı kalmıştır, geri kalan kuyulardan (AF-4, AF-9, AF-11, AF-13, AF-14, AF-16, AF-17, AF-20, AF-21, AF-22, AF-23) ise kaplıca, oteller ve AFJET'in sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Kuyuların açılışı sırasında elde edilen veriler ile 2000 yılında MTA tarafından yapılan testler sonucu elde edilen sıcaklık, kuyu başı basıncı ve debi değerleri derlenerek, Çizelge 1'de sunulmuştur.

SICAK SU AKİFERİNİN SAYISAL MODELİ

Jeotermal sisteme ait kavramsal modelden yola çıkılarak, sıcak su akiferine ait başlangıç ve sınır koşulları tanımlanmış ve HST3D model programı kullanılarak jeotermal sistem modellenmiş-



Şekil 3. Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanının kavramsal modeli.

Figure 3. The conceptual model of Afyon Ömer-Gecek geothermal field.

tır. Sıcak su akiferinin termal ve hidrolik parametrelerinin konumsal değişimine ait bir bilgi bulunmadığı için akifer homojen bir bütün olarak ele alınmıştır (Akan, 2002).

Sonlu Farklar Grid Tasarımı

Yaklaşık olarak 16 km²'lik bir alan kaplayan model alanı için oluşturulan grid ağı 66 kolon, 37 satır ve toplam 2442 tane bloktan oluşmaktadır. Tüm model alanı için her bir hücre (100x100) m²'lik bir alanı temsil etmektedir. HST3D modeli, her bir hücre içerisinde sadece tek bir kuyu bulunmasına izin vermektedir. Bu nedenle, sıcak su kuyuları çevresinde bu koşulu sağlamak amacıyla her bir hücre (50x50) m²'lik bir alanı temsil edecek şekilde daha sık gridlere bölünmüştür. Afyon Ömer-Gecek alanında, sıcak sular için bir rezervuar özelliği gösteren Afyon Metamorfitleri üstten geçirimsiz bir örtü ile kaplı olduğu için, basınçlı akifer olarak değerlendirilmiştir. Sıcaklık ve basınç gradyanını mümkün olduğunca hassas olarak modele aktarabilmek amacıyla akifer, 8 model katmanına ayrılmıştır. Her katmanın kalınlığı eşit olup, 100 metredir. Katman kalınlığı belirlenirken kuyuların çekim yap-

tığı derinlikler ve filtre aralıkları dikkate alınmıştır. Kuyuların su alma zonları göz önüne alınarak tüm kuyuların modellenebilmesi amacıyla akiferin 300 m ile 1100 m kotları arasındaki bölümü benzeştirilmiştir.

Sınır Koşulları

Isı taşınımı modellerinde, model için belirleyici sınır koşulları sıcaklık ve basıncıdaki değişimi ifade eden sabit sıcaklık ve sabit basınç sınır koşullarıdır. İnceleme alanında Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfitlerinin, alttan bir magmatik sokulumla temasta bulunduğu ve metamorfitler içerisinde bulunan yeraltısuyunun bu sokulum ile ısındığı varsayılmıştır. Bu yüzden model alanının alt sınırının sabit sıcaklığa sahip yeraltısuyu ile sınırlandırıldığı düşünülerek, en alt model katmanı sabit sıcaklık sınırı olarak benzeştirilmiştir. Bu amaçla 9. düğüm katmanında sabit sıcaklık değeri 150 °C olarak girilmiştir. Ömer-Gecek jeotermal sisteminde sıcak su akiferinin, yüksek kesimlerde yüzeylenen Paleozoyik yaşlı şistler aracılığıyla beslendiği düşünülerek, model alanında üstten sabit basınç sınırı tanımlanmış, 1. model katmanı atmosfere açık olduğu

Çizelge 1. Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında yer alan kuyulara ait bilgiler (Tamgaç vd., 2000).
Table 1. The list of the wells located in Afyon Ömer-Gecek geothermal field (Tamgaç et al., 2000).

Kuyu adı	Derinlik (m)	KB kotu (m)	KB sıcaklığı* (°C)	Dinamik sıcaklık** (°C)	Debi* (l/s)	Debi** (l/s)	KB basıncı** (kg/cm ²)	Açıldığı tarih
R-260	166.0	1028	92.0	100.28	20	30.0	1.02	1971
AF-01	905.0	1023	97.4	97.00	7-20	-	-	1974
AF-02	56.8	1026	-	-	-	-	-	1996
AF-03	250.0	1065	97.0	-	110	-	-	1975
AF-04	125.7	1061	95.0	-	80	-	-	1982
AF-05	207.4	1048	79.0	-	15	-	-	1982
AF-06	211.4	1044	92.0	-	10	-	-	1982
AF-07	210.0	1041	100.0	-	5-6	-	-	1984
AF-08	250.0	1033	91.0	-	5-10	-	-	1984
AF-09	320.0	1027	51.0	-	66	-	-	1990
AF-10	320.4	1027	98.0	-	100	-	-	1990
AF-11	185.0	1028	98.0	106.32	150	68.3	1.61	1996
AF-12	59.0	1033	88.0	-	15	-	-	1996
AF-13	560.0	1026	81.0	-	4.7	-	-	1996
AF-14	122.0	1039	96.0	104.16	100	51.0	1.02	1996
AF-15	170.7	1030	97.0	106.35	4-5	38.0	1.65	1996
AF-16	218.0	1033	96.0	105.50	100	35.8	2.03	1996
AF-17	260.5	1034	99.0	101.13	80	22.7	0.91	1996
AF-18	363.6	1033	98.0	-	Gayzer	-	0.97	1996
AF-19	305.3	1031	90.0	-	100	54.3	-	1997
AF-20	230.0	1035	90.0	100.55	100	54.3	0.97	1997
AF-21	212.0	1026	91.0	102.24	45	63.4	2.03	1997
AF-22	227.0	1065	95.0	-	50-70	-	-	1997
AF-23	235.8	1045	90.0	-	50	-	-	1997

KB:Kuyubaşı

* Kuyunun açıldığı tarihte alınan ölçümler

** 2000 yılında MTA tarafından yapılan testler sırasında alınan ölçümler

için, sabit basınç değeri atmosferik basınca eşit olarak girilmiştir. Yeraltısuyu akımının olabileceği kuzey ve batı sınırları sabit basınç sınırı olarak benzeştirilmiştir. Bu sınırlarda, yüzeyde toplam yük 1100 m olarak alınmış, her bir model katmanında basıncın derinlikle değişimi bu değere göre hesaplanmıştır. Alanın doğusunda, ovaya yakın kesimlerde sıcak su akiferi ile Neojen birimlerin sınırında sabit sıcaklık sınırı tanımlanmış, sıcaklık değeri soğuk su akiferinin sıcaklığını yansıtacak şekilde 20 °C verilmiştir (Akan, 2002).

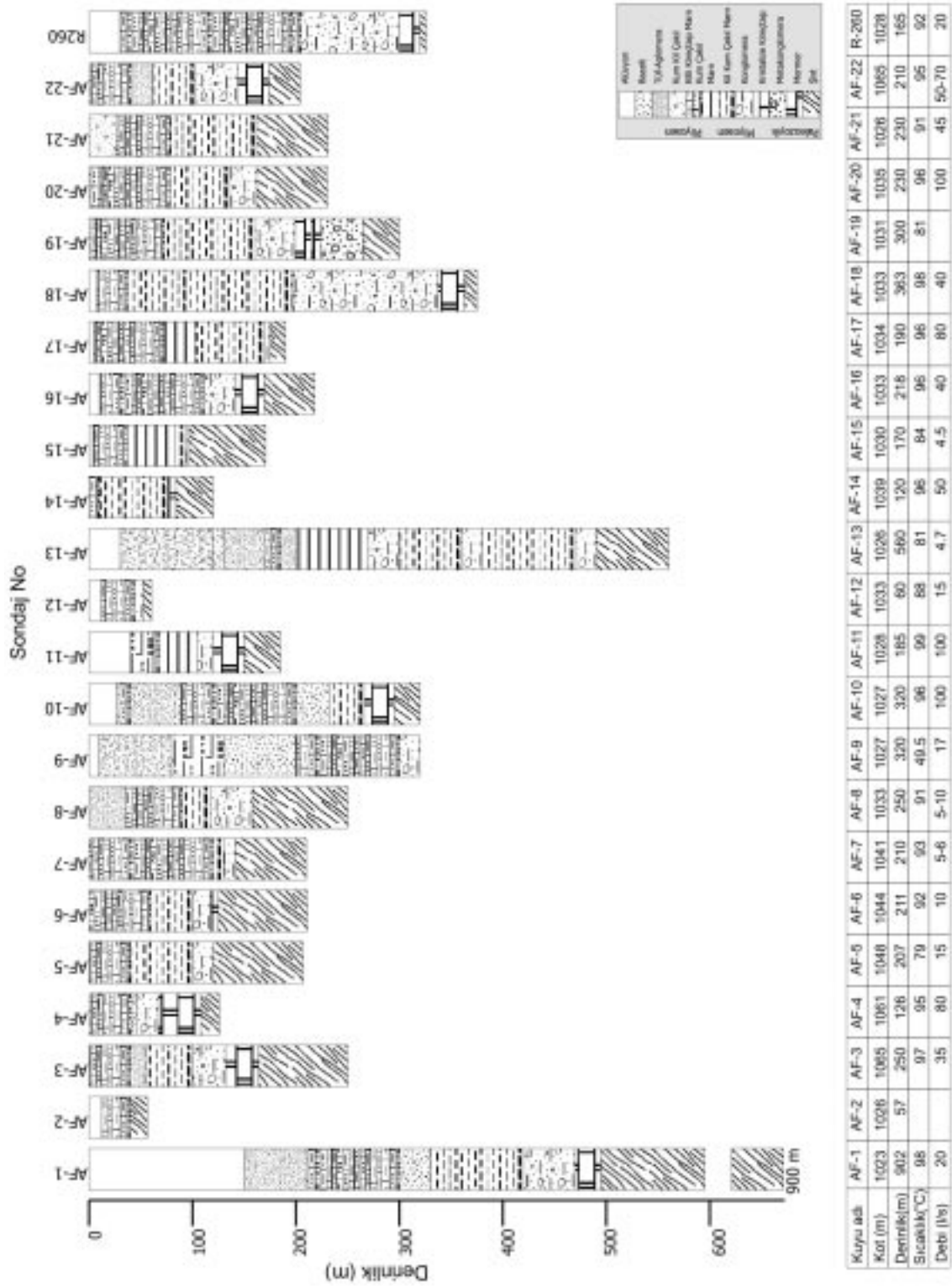
Başlangıç Koşulları ve Model Süresi

Model alanına şistin tavan topoğrafyası aktarılarak, sıcak su akiferinin sınırları tanımlanmıştır. Başlangıç basınç değerleri, MTA tarafından kuyularda yapılan basınç testlerinde elde edilen sabit basınç değerleri kullanılarak üretilmiştir. Modelde, kuyularda değişik derinliklerde ölçülen sabit basınç değerlerinden her bir model katma-

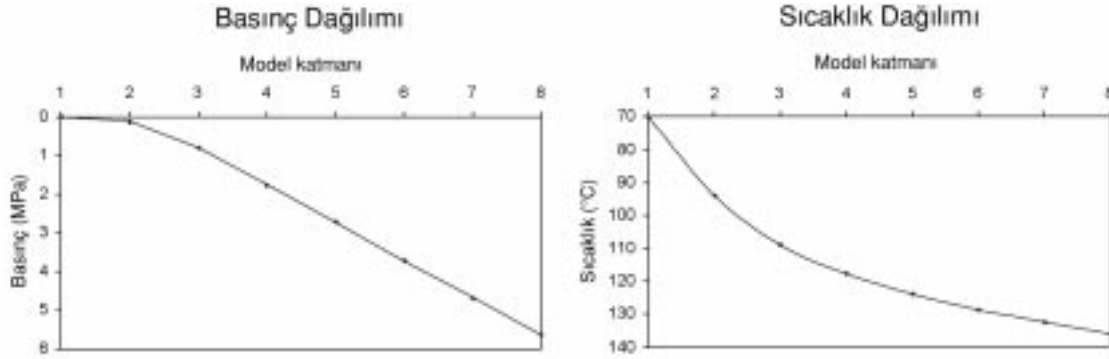
nına karşılık gelen ortalama basınç değerleri kullanılarak basınç dağılımı oluşturulmuştur. Başlangıç sıcaklık değerleri de yine MTA tarafından kuyularda değişik derinliklerde ölçülen sabit sıcaklık değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Kuyularda derinlikle değişen sabit sıcaklık değerleri model katmanlarına ortalama olarak dağıtılmıştır (Şekil 5). Model süresi 20 yıl olarak alınmıştır. AFJET, sıcak su kuyularını Eylül ve Mayıs ayları arasında, şehir ısıtmacılığının yapıldığı dönem boyunca çalıştırmaktadır. Bu nedenle, modelde her yıl 210 gün boyunca kuyulardan çekim yapılmış, geri kalan 150 günde ise kuyular çalıştırılmamıştır. Reenjeksiyon deneimlerinde de bu durum gözönüne alınarak kuyulara her yıl 210 gün boyunca su verilmiştir.

Akifere Ait Hidrolik-Termal Parametreler

Akifere ait hidrolik ve termal parametrelerin bir kısmı MTA tarafından bölgede yapılan testlerden elde edilen verilerden yararlanılarak hesap-



Şekil 4. Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında yer alan kuyuların logları (Öktü, 1997; MTA, 1997).
 Figure 4. The well logs of Afyon Ömer-Gecek geothermal field (Öktü, 1997; MTA, 1997).



Şekil 5. Model alanı içinde basınç ve sıcaklık değerleri dağılımı.
Figure 5. Pressure and temperature distribution in the model area.

lanmış, bir kısmı ise literatürden derlenmiştir. Akifere ait permeabilite değeri Akan (2002) tarafından $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Porozite, düşey yönde sıkışabilirlik ve ısı kapasitesi değerleri ise, literatür araştırmaları sonucunda şistler için karakteristik kabul edilen değerlerden yararlanılarak elde edilmiştir. Model alanının her yerinde, tüm model katmanları için permeabilite değeri $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, porozite değeri 0.2, düşey yönde sıkışabilirlik $1 \times 10^{-8} \text{ (Pa}^{-1})$ ve ısı kapasitesi ise $2.24 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{°C}$ olarak alınmıştır. Literatürde çeşitli bölgelerde değişik kayaç ve mineraller için ölçülen termal iletkenlik değerlerinden, şistler için uygun olan değer seçilerek modelde kullanılmıştır. Horai (1971) tarafından şistlerin termal iletkenlik katsayısı $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ olarak belirlenmiştir. Dispersivite katsayısı ise düşey ve yatay yönde yine tüm model alanı için uniform kabul edilmiş ve 10 m olarak alınmıştır. Akifere ait hidrolik ve termal parametrelerin belirlenmesine ilişkin ayrıntılı bilgi Akan (2002) tarafından verilmiştir.

Model Kalibrasyonu

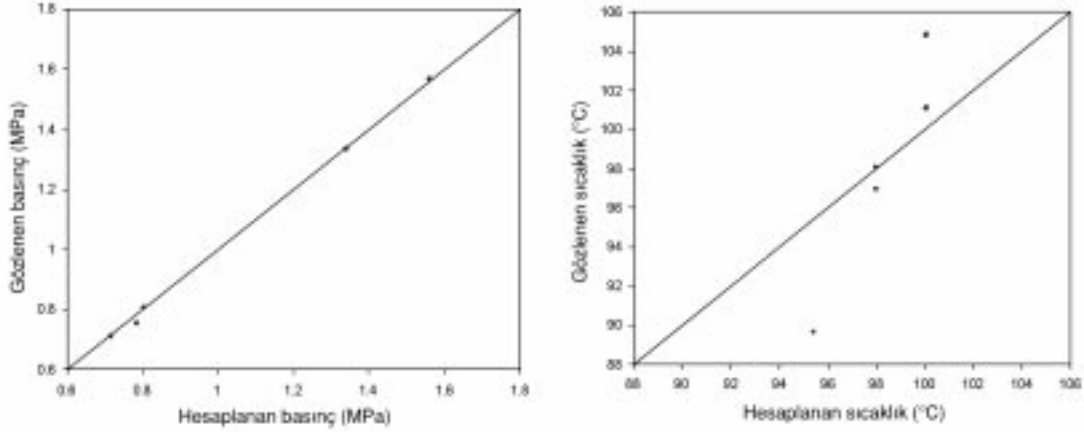
Model kalibrasyonu, Tamgaç vd. (2000) tarafından inceleme alanındaki kuyularda yapılan statik basınç ve statik sıcaklık testlerinde elde edi-

len basınç ve sıcaklık değerleri ile yapılmıştır. Kalibrasyon inceleme alanında yer alan 5 adet kuyuya ait veriler kullanılarak yapılmıştır, bu kuyular R-260, AF-22, AF-21, AF-17 ve AF-16 kuyularıdır. Kalibrasyon sırasında Ömer-Gecek jeotermal alanında halen çeşitli amaçlarla kullanılmakta olan kuyulardan, basınç, sıcaklık ve basınç toparlanma (pressure build-up) testlerinin yapıldığı kuyular seçilmiştir. Bu testler sırasında kuyudan yapılan çekime karşılık basınç ve sıcaklık değerlerinin derinlik ve zamanla değişimi belirlenmiştir. Kalibrasyon sırasında kuyuların çekim yaptıkları derinliğe karşılık gelen model katmanları için hesaplanan basınç ve sıcaklık değerleri ile Nisan 2000'de gözlenen basınç ve sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 2). Gözlenen ve hesaplanan basınç değerleri arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Sıcaklık değerlerinde ise, gözlenen ve hesaplanan değerler arasındaki ortalama fark 2.5 °C , en yüksek fark ise 5.6 °C 'dir, sadece iki adet kuyuda ortalama sıcaklık farkından daha yüksek sıcaklık farkı olduğu belirlenmiştir (Şekil 6). Model sonucunda, kuyularda model katmanına karşılık gelen tek bir sıcaklık değeri hesaplanmıştır, sıcaklık testlerinde ise aynı model katmanına denk gelen birden fazla sıcaklık ölçümü mevcuttur, bu öl-

Çizelge 2. Model kalibrasyonu sonucunda hesaplanan ve gözlenen basınç ve sıcaklık değerleri.

Table 2. Observed and calculated pressure and temperature results obtained from model calibration.

Kuyu adı	Yükselti (m)	Gözlenen basınç (MPa)	Gözlenen sıcaklık (°C)	Hesaplanan basınç (MPa)	Hesaplanan sıcaklık (°C)
R-260	900-1000	0.811400	89.7	0.800906	95.38
AF-22	900-1000	0.714491	97.012	0.713759	97.96
AF-21	800- 900	1.568744	104.87	1.558218	100.01
AF-17	800- 900	1.337758	101.16	1.336259	100.01
AF-16	900-1000	0.758856	98.135	0.781849	97.96



Şekil 6. Model sonucunda basınç ve sıcaklık değerleri için elde edilen kalibrasyon grafikleri.
Figure 6. The calibration graphics of pressure and temperature distribution obtained from model results.

çümlerden söz konusu katmanlar için ortalama bir sıcaklık değeri hesaplanmış ve kalibrasyon sırasında bu ortalama değerler kullanılmıştır. Şekil 6'da sıcaklık için çizilen kalibrasyon grafiğinde, doğrudan uzaklaşan değerler, kalibrasyon sırasında model katmanına karşılık gelen ortalama sıcaklık değerlerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu bilgi göz önüne alındığında bu sapmalar model uyumunu önemli ölçüde etkilememektedir. Bu nedenle model parametrelerinde herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir (Akan, 2002).

Hassasiyet Analizi

Modelin, permeabilite (k), termal iletkenlik (K) ve yatay ve düşey yöndeki dispersivite değerlerine göre hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu amaçla,

permeabilite, termal iletkenlik ve dispersivite değerleri değiştirilerek model yeniden çalıştırılmış ve bu değerlerin sıcaklık ve basınç değerlerinde meydana getirdiği değişimler hesaplanmıştır. Hassasiyet analizi sırasında permeabilite, termal iletkenlik ve dispersivite değerleri değiştirilirken, bu parametrelerin alabileceği değerler literatürden araştırılarak uygun değişim aralıkları belirlenmiştir. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen maksimum, minimum ve ortalama hassasiyet katsayısı değerleri Çizelge 3'de yer almaktadır. Buna göre, permeabilite, termal iletkenlik ve dispersivite değerlerinde meydana gelen değişimlerin model sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak tek tek model parametrelerinin model sonuçları üzerinde belirleyici bir rolü bulunmamaktadır.

Çizelge 3. Model parametrelerinin hassasiyet katsayısı değerleri.
Table 3. The sensitivity coefficient vales of the model parameters.

	%Değişim	Basınç (MPa)			Sıcaklık (°C)		
		Min.	Max.	Ort.	Min.	Max.	Ort.
Permeabilite	100	0.999	1.700	1.145	0.995	1.002	0.998
	200	1.000	1.936	1.196	0.992	1.003	0.999
	300	1.000	2.055	1.221	0.992	1.005	0.998
	400	1.000	2.127	1.152	0.989	1.034	1.002
Termal iletkenlik	10	0.999	1.000	0.996	0.999	1.005	1.000
	20	0.999	1.000	0.996	0.903	1.117	1.023
	30	0.999	1.000	0.996	0.903	1.078	0.992
	40	0.999	1.000	1.000	0.999	1.122	1.020
	80	0.999	1.000	0.996	0.999	1.044	1.013
Dispersivite	10	0.999	1.000	0.996	0.999	1.021	1.001
	20	0.999	1.000	0.996	0.999	1.117	1.037
	30	0.999	1.000	0.996	0.930	1.078	1.006
	40	0.999	1.000	1.000	0.999	1.018	1.003

REENJEKSİYON UYGULAMALARININ REZERVUAR ÜZERİNE ETKİSİNİN MODELLENMESİ

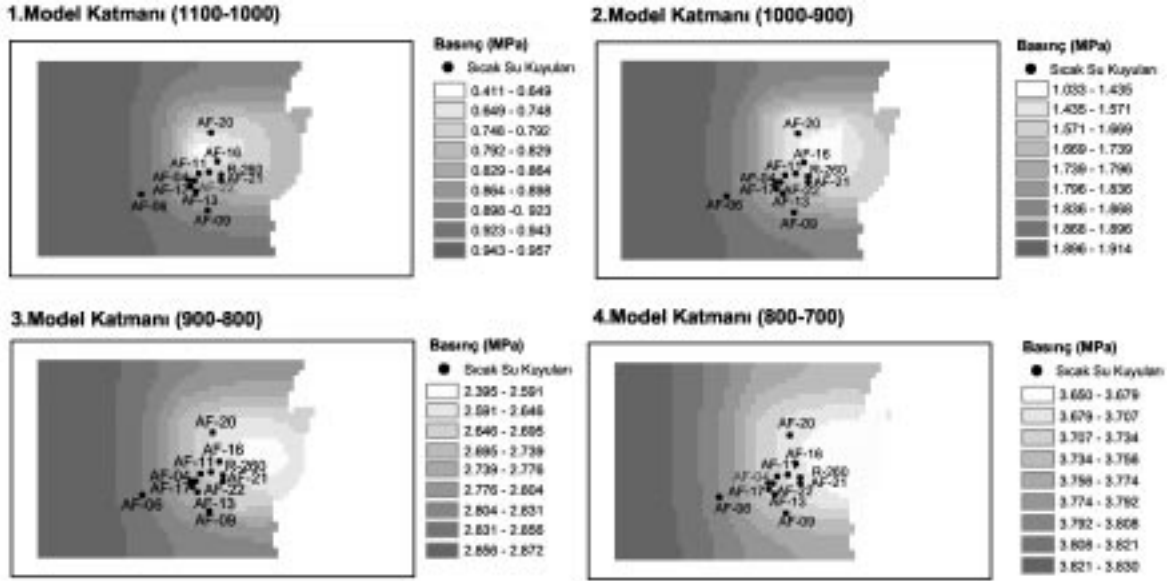
Jeotermal sistemlerde kullanımdan dönen jeotermal suyun reenjeksiyon yolu ile sisteme yeniden kazandırılması sistemin yenilenebilmesi, dolayısıyla jeotermal enerjiden maksimum düzeyde faydalanabilme açısından önem taşımaktadır. Bu aşamada ortaya çıkan en önemli sorun reenjeksiyon sahasının ve uygun derinliğin seçimidir. Şimşek (1999), dünyanın önemli jeotermal alanlarındaki reenjeksiyon uygulamaları ile ilgili olarak yaptığı çalışmada, reenjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki uzaklığın belirlenmesinde, sahanın hidrojeolojik özelliklerinin yanı sıra, üretim kuyularının kapasiteleri, sıcaklık ve su buharı oranı, yüksek geçirgenliğe sahip zonların bulunması, enjekte edilen suyun sıcaklığı, enjekte edilen toplam su miktarı gibi teknik faktörlerin önemli rol oynadığını bildirmiştir. Yine bu çalışma kapsamında reenjeksiyon derinliğinin üretim kuyusu ile aynı zonda seçilebileceği gibi, alt ve üst zonlara reenjeksiyon yapılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.

Afyon'da ısıtmadan dönen sıcak su, halen Akarçay'a verilmekte ve bu durum yüzey sularında kirliliğe neden olmaktadır. Kullanımdan dönen jeotermal suyun kuyular aracılığı ile tekrar sisteme verilmesi (reenjeksiyon) hem sıcak suyun sistemde yenilenmesi, hem de dönüşüm suyunun değerlendirilmesi açısından yararlı olacaktır. MTA, 2000 yılında Afyon Ömer-Gecek sahasında üretim amaçlı kullanılmayan ve atıl olarak bekleyen AF-1, R-260, AF-3, AF-4 ve AF-22 numaralı kuyularda reenjeksiyon testleri yaparak kuyuların su alma kapasitelerini belirlemiştir. Bu kuyulardan AF-1, R-260 ve AF-3 kuyularında kullanılan pompaların uygun olmaması nedeniyle injektivite değeri belirlenememiş ve akışkanın kuyuya basılması sırasında basınçla karşılaşmıştır. Ancak, AF-4 ile AF-22 nolu kuyulara 5000 m³/gün debi ile su verilmiş ve herhangi bir karşı basınçla karşılaşmamıştır, dolayısıyla bu kuyuların yüksek su alma kapasitesine sahip olduğu ve reenjeksiyon kuyusu olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir (Tamgaç vd., 2000).

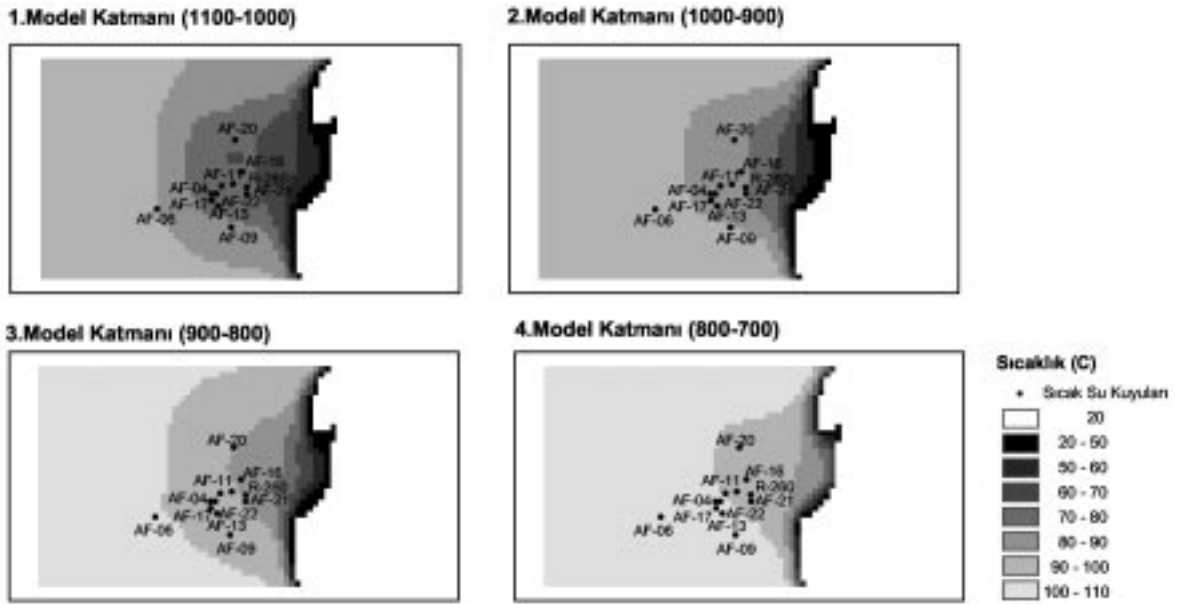
Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında halen çalışmakta olan kuyulardan toplam 21600 m³/gün (250 l/s) çekim yapılmaktadır ve AFJET tarafından şehir ısıtmacılığında kullanılan sıcak suyun, kullanım sonucu sıcaklığı yaklaşık 40 °C

civarındadır. Bu çalışma kapsamında, söz konusu alanda reenjeksiyon yapılması durumunda, kullanımdan dönen jeotermal suyun tamamının tek bir kuyu ile sisteme geri verilmesinin jeotermal sistemde meydana getireceği değişimi ortaya koymak amacıyla HST3D modeli kullanılarak reenjeksiyon denemesi yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle MTA tarafından reenjeksiyon için uygun olduğu belirlenen AF-4 kuyusu aracılığı ile 21600 m³/gün debi ile 40 °C sıcaklıktaki su, bir yıl içerisinde 210 gün boyunca sisteme verilmiş ve model 20 yıl süre ile çalıştırılarak sistemin davranışı belirlenmiştir. Modelde reenjeksiyon süresinin 210 gün olarak belirlenmesinin nedeni AFJET'in kuyuları, ısıtma dönemi olan 7 ay (210 gün) boyunca kullandığının göz önüne alınmasıdır. Başlangıçta model, 20 yıl boyunca sistemin şu anki işletme koşulları göz önüne alınarak, reenjeksiyon yapılmaksızın çalıştırılmış ve buna göre elde edilen basınç ve sıcaklık dağılımı Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur. Buna göre tüm model katmanlarında basınç değerleri model alanının batısına doğru artmakta, en düşük basınç değerleri sıcak su kuyularının çevresinde görülmektedir. Kuyuların yoğun olarak çekim yaptığı 2. model katmanında kuyuların bulunduğu alanda, model alanının geneline göre 0.8 MPa varan basınç düşüşü gözlenmektedir (Şekil 7). Model alanında sıcaklık değerleri 20-110 °C arasında değişmektedir. Soğuk su akiferinin sınırında 20 °C'e yakın sıcaklık değerleri gözlenirken alanın batısına doğru sıcaklık değeri 110 °C'e ulaşmaktadır. Model katmanlarında derinlere indikçe sıcaklık değerlerinde genel bir artış gözlenmektedir. Bu durum, rezervuara yaklaştıkça sıcaklık değerinde meydana gelen artışı yansıtmaktadır. Ancak özellikle 1. ve 2. model katmanlarında görüldüğü gibi kuyular çevresinde sıcaklık değerinde alanın geneline göre kademeli olarak 20 °C'e yakın bir azalma görülmektedir (Şekil 8).

Reenjeksiyon sonucunda elde edilen basınç dağılımı, kuyuların 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılmaksızın çalıştırılması sonucu elde edilen model sonuçları ile karşılaştırıldığında, 1. ve 2. model katmanlarında AF-4 kuyusu çevresinde basınçta dikkate değer bir artış meydana geldiği görülmektedir. 1. model katmanında basınçta 0.186-0.329 MPa, 2. model katmanında ise, 0.168-0.135 MPa arasında değişen bir artış meydana gelmektedir (Şekil 9). Bu artış, AF-4 kuyusunda filtrenin 931-1002 m arasında yer al-



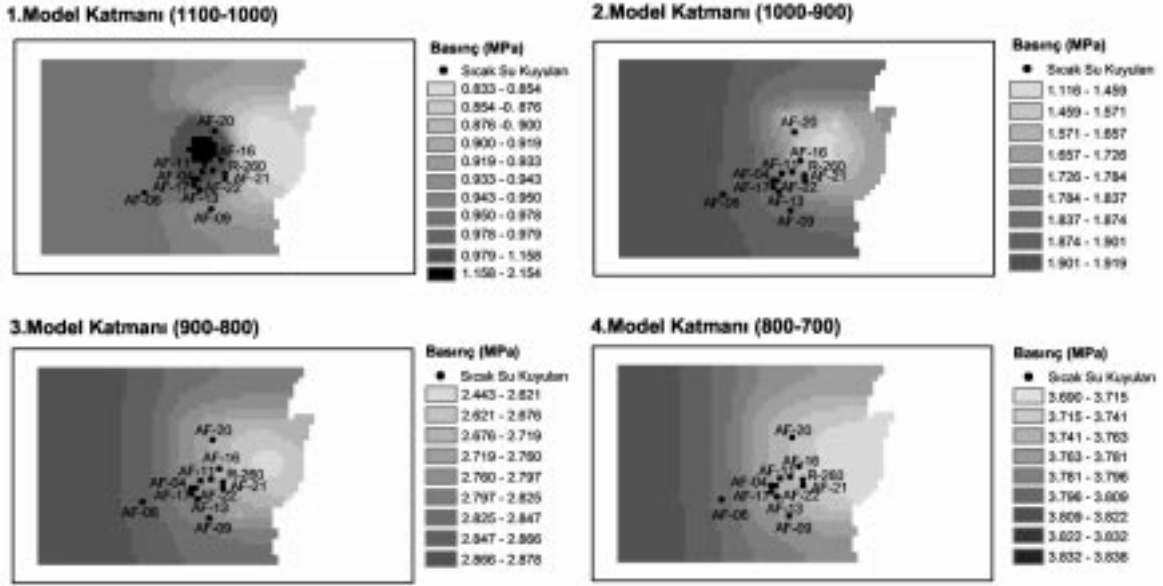
Şekil 7. Afyon Ömer-Gecek bölgesinde HST3D modeli ile hesaplanan basınç değerlerinin dağılımı.
Figure 7. Distribution of calculated pressure values by HST3D in Afyon Ömer-Gecek field.



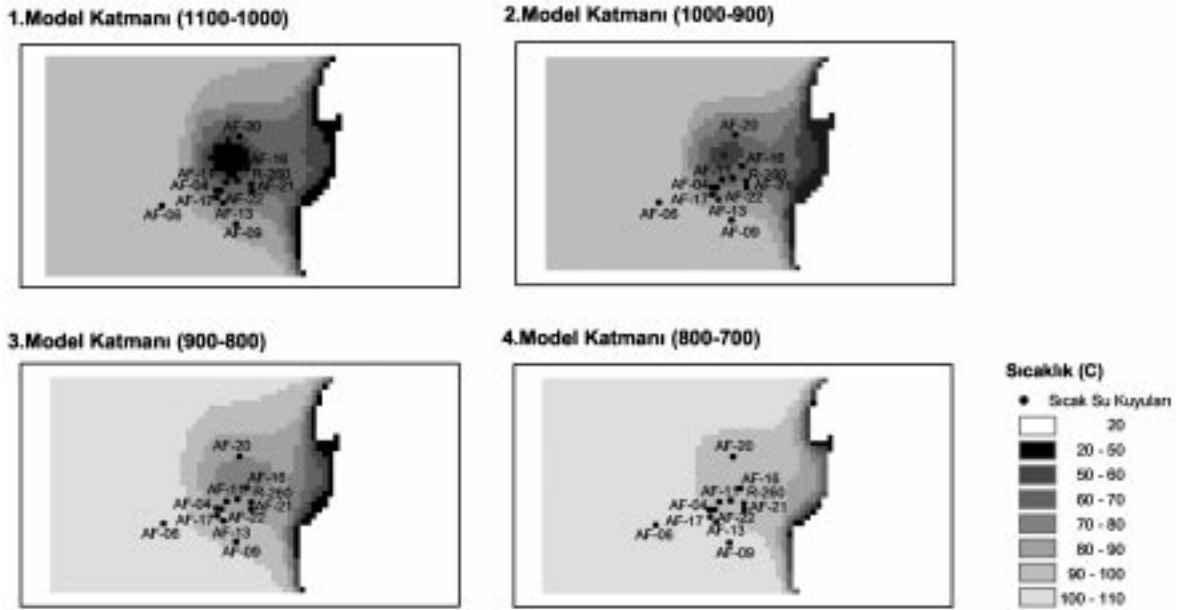
Şekil 8. Afyon Ömer-Gecek bölgesinde HST3D modeli ile hesaplanan sıcaklık değerlerinin dağılımı.
Figure 8. Distribution of calculated temperature values by HST3D in Afyon Ömer-Gecek field.

ması, dolayısıyla reenjeksiyonun 1. ve 2. model katmanına yapılmasından kaynaklanmaktadır. Aynı sebeple, AF-4 kuyusu çevresinde sıcaklık dağılımında, her iki model katmanında düşüş meydana geldiği görülmektedir. Özellikle 1. model katmanında AF-11, AF-16 ve AF-20 kuyuları arasında kalan alanda sıcaklık değeri 20-50 °C' e kadar düşmektedir. 2. model katmanında

ise, yine bu kuyular arasında sıcaklık değeri 50-60 °C arasında değişmektedir. 3. model katmanında da reenjeksiyondan kaynaklanan soğuma devam etmekte ve AF-11, AF-16 ve AF-20 kuyuları arasında kalan alanda sıcaklık 70-80 °C arasında değerler almaktadır (Şekil 10). Modelde AF-22 kuyusunda da, aynı sıcaklık ve debi ile reenjeksiyon denemesi yapılmış ve model 20 yıl



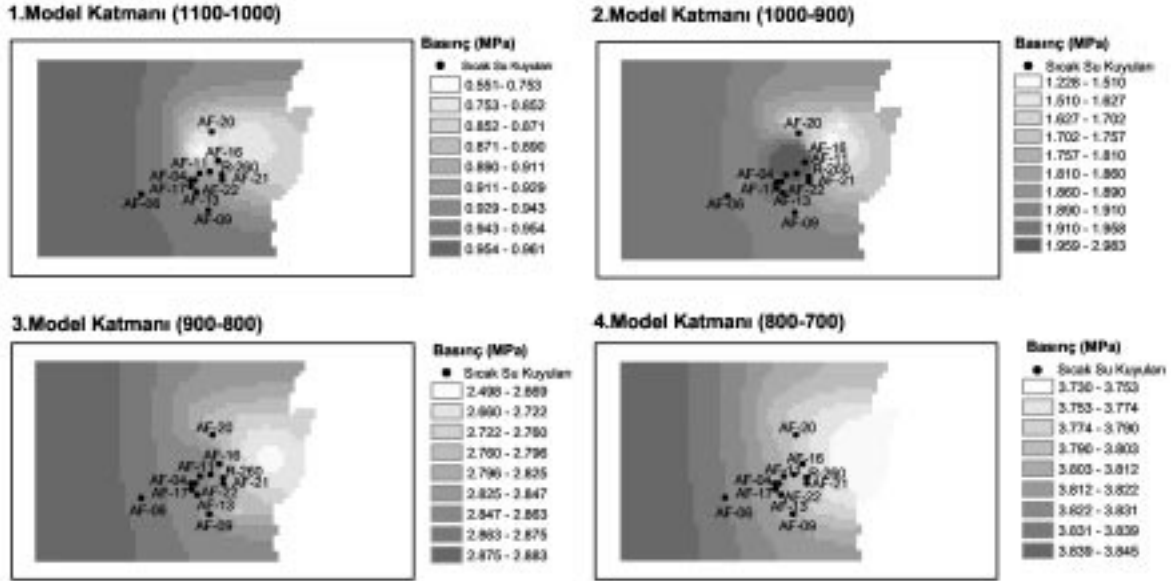
Şekil 9. Modelde AF-4 kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen basınç dağılımı.
Figure 9. Distribution of calculated pressure values obtained from re-injection to AF-4 well for 20 years by HST3D.



Şekil 10. Modelde AF-4 kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı.
Figure 10. Distribution of calculated temperature values obtained from re-injection to AF-4 well for 20 years by HST3D.

süre ile çalıştırılarak model alanındaki basınç ve sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Model alanındaki basınç dağılımı incelendiğinde 2. ve 3. model katmanlarında AF-22 kuyusu çevresinde basınçta 0.219-0.241 MPa ile 0.124-0.152 MPa artış meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 11). Si-

caklık dağılımına ait sonuçlar incelendiğinde ise, 1, 2 ve 3. model katmanında soğuma meydana geldiği belirlenmiştir. 20 yıl için tüm kuyuların çalıştırılması sonucu elde edilen sıcaklık sonuçları ile karşılaştırıldığında, kuyuların çevresinde 1. model katmanında 20 °C, 2. model



Şekil 11. Modelde AF-22 kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen basınç dağılımı.

Figure 11. Distribution of calculated pressure values obtained from re-injection to AF-22 well for 20 years by HST3D.

katmanında 60 °C ve 3. model katmanında 30 °C' e varan değişimler gözlenmiştir (Şekil 12). Bu durum, AF-22 kuyusunun filtre aralığının 838-954 m arasında yer alması dolayısı ile dönüşüm suyunun 2. ve 3. model katmanına verilmesinden kaynaklanmaktadır.

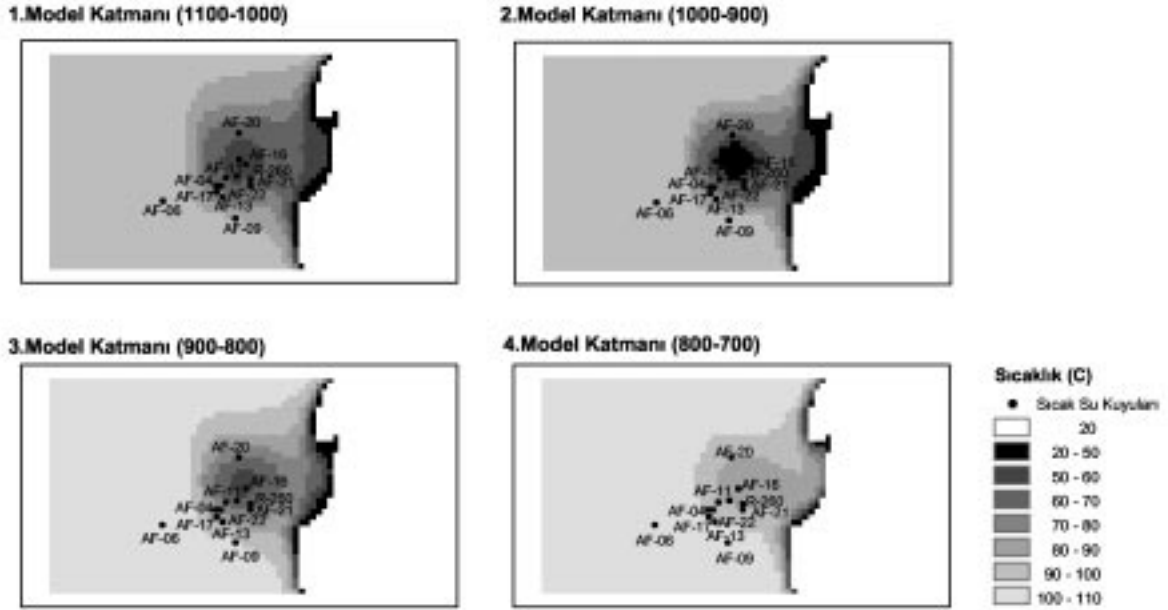
Ayrıca, mevcut kuyuların çekim yaptığı zondan daha derinlere reenjeksiyon yapılması halinde jeotermal sistemin davranışının ortaya konması amacıyla "Reen" kuyusu ile 300-400 m kotlarının benzeştirildiği 8. model katmanına 21600 m³/gün debi ile 40 °C sıcaklıkta su verilmiş ve model yine 20 yıl süre ile çalıştırılmıştır. Model sonucunda hesaplanan basınç dağılımı incelendiğinde, kuyuların çevresinde önemli bir basınç dağılımı gözlenmemektedir (Şekil 13). Sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise, kuyuların yoğun olarak çekim yaptığı ilk 4 model katmanında herhangi bir sıcaklık değişimi meydana gelmediği belirlenmiştir (Şekil 14).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, öncelikle MTA tarafından Ömer-Gecek sahasında yapılan test çalışmaları sonucunda önerilen AF-4 ve AF-22 kuyularında model aracılığıyla reenjeksiyon denemesi yapılmış ve jeotermal sistemde basınç ve sı-

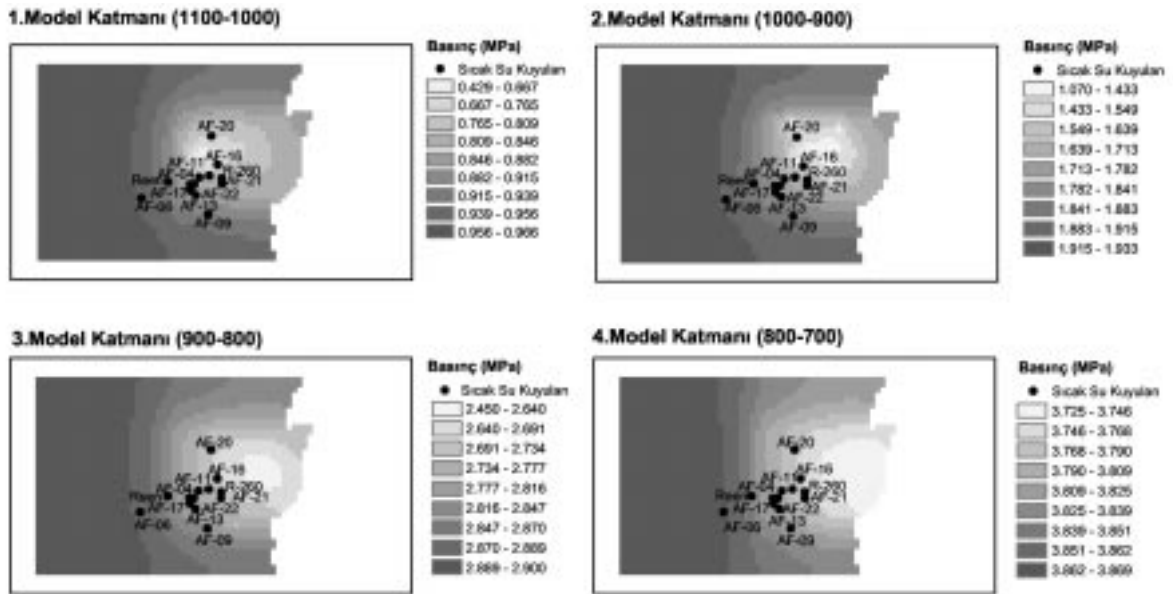
caklık değişimleri benzeştirilmiştir. Reenjeksiyon yöntemlerinden birisi kullanımdan dönen jeotermal suyun derin kuyular aracılığıyla rezervuarın alt zonlarına verilmesidir. Mevcut kuyuların çekim yaptığı zondan daha derinlere reenjeksiyon yapılması durumunda rezervuarda meydana gelecek basınç ve sıcaklık dağılımının ortaya konabilmesi amacıyla, halen üretim amaçlı kullanılan kuyuların etki yarıçaplarının dışında bir kuyu yeri belirlenmiştir. Modelde "Reen" adı verilen bu kuyu aracılığı ile 300-400 m kotlarının benzeştirildiği 8. model katmanına reenjeksiyon yapılmıştır. AF-4 ve AF-22 kuyusunda özellikle suyun verildiği model katmanların da kuyular çevresinde basınç artışı ve soğuma olduğu belirlenmiştir. Ancak 300-400 m kotlarında filtre açıklığı bulunan "Reen" kuyusu ile reenjeksiyon yapılması durumunda sıcak su akiferinin olumsuz etkilenmediği buna karşılık sistem içerisinde soğumayı önlediği belirlenmiştir.

Jeotermal sistemlerde kullanımdan dönen jeotermal suyun reenjeksiyon yolu ile sisteme yeniden kazandırılması sistemin yenilenebilmesi, dolayısıyla jeotermal enerjiden maksimum düzeyde faydalanabilme açısından önem taşımaktadır. Bunun yanısıra reenjeksiyon, gerek çevre kirliliğinin önlenmesi gerekse rezervuar basıncının korunması amacıyla da tercih edilmesi gere-



Şekil 12. Modelde AF-22 kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı.

Figure 12. Distribution of calculated temperature values obtained from re-injection to AF-22 well for 20 years by HST3D.

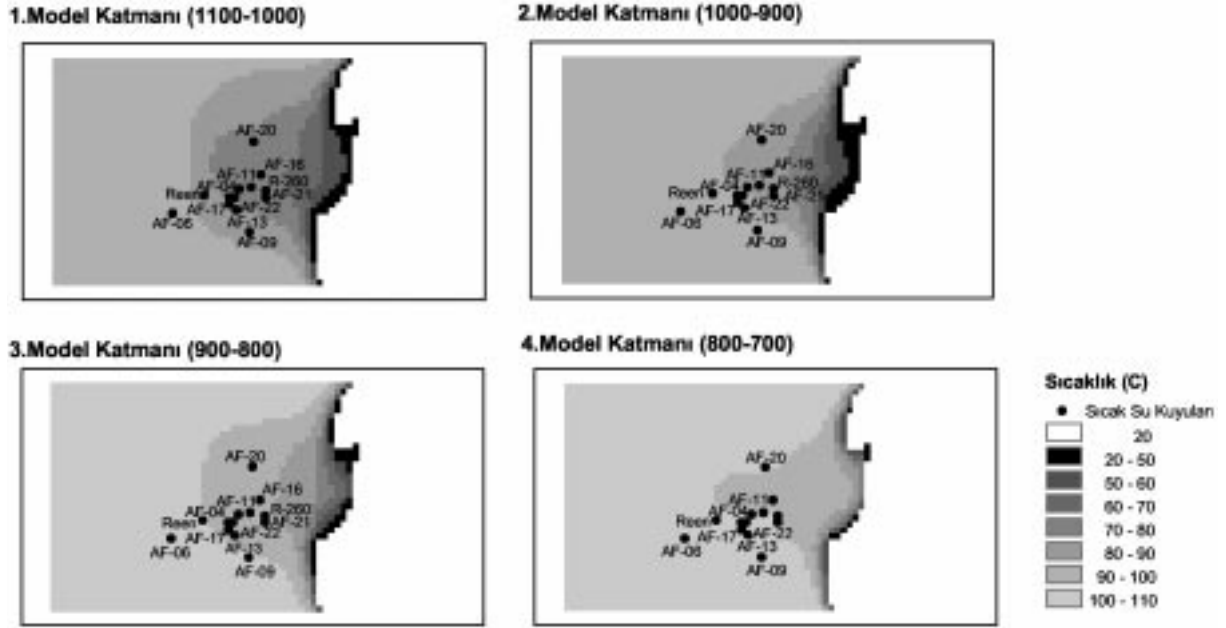


Şekil 13. Modelde 300-400 m kotlarına Reen kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen basınç dağılımı.

Figure 13. Distribution of calculated pressure values obtained from re-injection to Reen well (elevation of 300-400 m) for 20 years by HST3D.

ken bir yöntemdir. Ancak model sonuçlarında da görüldüğü gibi, mevcut kuyuların çekim yaptığı zonlara reenjeksiyon yapılması kuyular çevresinde soğumaya ve basıncın olumsuz olarak et-

kilenmesine neden olmaktadır. Oysa alt zonlara reenjeksiyon yapılması durumunda kuyuların çekim yaptığı zonda basınç ve sıcaklıkta olumsuz bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum-



Şekil 14. Modelde 300-400 m kotlarına Reen kuyusundan 20 yıl süre ile reenjeksiyon yapılması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı.

Figure 14. Distribution of calculated temperature values obtained from re-injection to Reen well (elevation of 300-400 m) for 20 years by HST3D.

da, ısıtmadan dönen suyun model alanına açılan derin bir kuyu aracılığı ile sıcak su akiferine verilmesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir.

Bölgede yer alan derin kuyularda reenjeksiyon denemelerinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Çünkü reenjeksiyonun rezervuar üzerine etkilerinin izlenmesi, başarılı bir reenjeksiyon uygulamasının gerçekleştirilmesi için en önemli etkindir. Reenjeksiyon çalışmalarından önce ve sonra enjekte edilen soğuk suyun üretim kuyuları üzerine etkisinin düzenli ölçümlerle izlenmesi soğuma etkilerinin zamanında belirlenmesi açısından son derece faydalı olacaktır.

KATKI BELİRTME

Yazarın, doktora tezinin bir bölümünü içeren bu araştırmada, Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi, 02.T05.604.002 no'lu proje kapsamında maddi destek sağlamıştır. Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) ile Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü arasında yürütülen "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli" Projesi kapsamında jeolojik ve hidrojeolojik verilerin toplanması, bil-

gisayar ortamına aktarılması, ulaşım, konaklama ve arazi çalışmaları sırasında destek sağlanmıştır. AFJET Şirketi kuyularına ait sondaj logları ve kuyu testlerine ait sonuçların kullanılması konusunda anlayış göstermiştir. Yrd. Doç. Dr. Levent TEZCAN (Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü), çalışmanın her aşamasında yardımcı ve yol gösterici olmuştur. Yazar yukarıda adı geçen kişi ve kurumlara teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akan, B., 2002. Afyon Ömer-Gecek sıcak su akiferi hidrojeolojik modeli. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Ankara, 90 s (yayımlanmamış).
- Ercan, T., Ölmez E., Matsuda, J.I., Nagao, K., and Kita, I., 1994. Chemical and isotopic features of hot and mineral waters and their gas content from Northern and Western Anatolia. Energy Bulletin of Turkey, 1(2), 10-20.
- Erişen, B., 1972. Afyon-Heybeli (Kızılkilise) jeotermal araştırma sahasının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. MTA Rapor No:5490, 74 s (yayımlanmamış).

- Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluođlu, Ü. ve Aydar, E., 1996. Afyon yöresi, metamorfik ve volkanik kayaların jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelenmesi. TÜBİTAK Proje Raporu, Proje No: YBAG-004/DPT, 214 s (yayımlanmamış).
- GSJ-MTA, 1992. Summary of the GSJ-MTA cooperative project on the geothermal system in Turkey, examples at Hasandağı-Zıga and Sivrihisar-Sofular-Acıgöl areas in Central Anatolia and Afyon area in Western Anatolia, 12 pp (unpublished).
- Horai, K., 1971. Thermal conductivity of rock forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1278-1308.
- Karamandersi, İ.H., 1972. Afyon K24-b paftası detay jeoloji etüdü ve jeotermal alan olanakları hakkında. MTA Rapor No: 5733, 58 s (yayımlanmamış).
- Kipp, K.L., 1987. HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 86-4095, Denver, Colorado, 393 pp.
- Metin, S., Genç, İ. ve Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının jeolojisi. MTA Rapor No: 2113 (yayımlanmamış).
- Mutlu, H., 1996. Geochemical assesment of thermal waters from the Afyon geothermal area: geothermometry applications and fluid-mineral equilibria. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 169 pp (unpublished).
- MTA, 1997. AFJET adına Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahalarında yapılan sıcaksu sondajları (AF-14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22) bitirme raporu (yayımlanmamış).
- Öktü, G., Kara, İ. ve Önder, İ., 1997. Afyon ilinde yer alan Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı-Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal enerji sahalarının detay etüdü. MTA Rapor No:10027, 41 s (yayımlanmamış).
- Şimşek, Ş., 1993. Isotope survey of geothermal systems of Central Anatolia. IAEA Coordinated Research Program between HU-UKAM and IAEA, Research Contract No:6716/RB, Final Report, 77 pp (unpublished).
- Şimşek, Ş., 1999. Jeotermal alanlarda reenjeksiyon uygulamaları. *Enerji Dünyası, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 26, 12-21.
- Tamgaç, Ö.F., Güner, A., Sarp, S., Yıldırım, N., Durak, S., Küçük, O. ve Koçak, A., 2000. Afyon-Ömer-Gecek jeotermal sahasının koruma alanları, test ve potansiyel değerlendirme raporu. MTA Rapor No:10388, 66 s (yayımlanmamış).
- Tatlı, S., 1973. Afyon-Gazlıgöl-Susuz alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. MTA, Rapor No: 2588 (yayımlanmamış).
- Tezcan, L., Meriç, B.T., Dođdu, N., Akan, B., Atilla, A. Ö. ve Kurttaş, T., 2002. Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli. Hacettepe Üniversitesi - Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM)-Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Final Raporu, 339 s (yayımlanmamış).
- Yılmaz, Ö., 1999. Jeotermal enerji ve Afyon'da kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınları, Afyon, 93 s.