

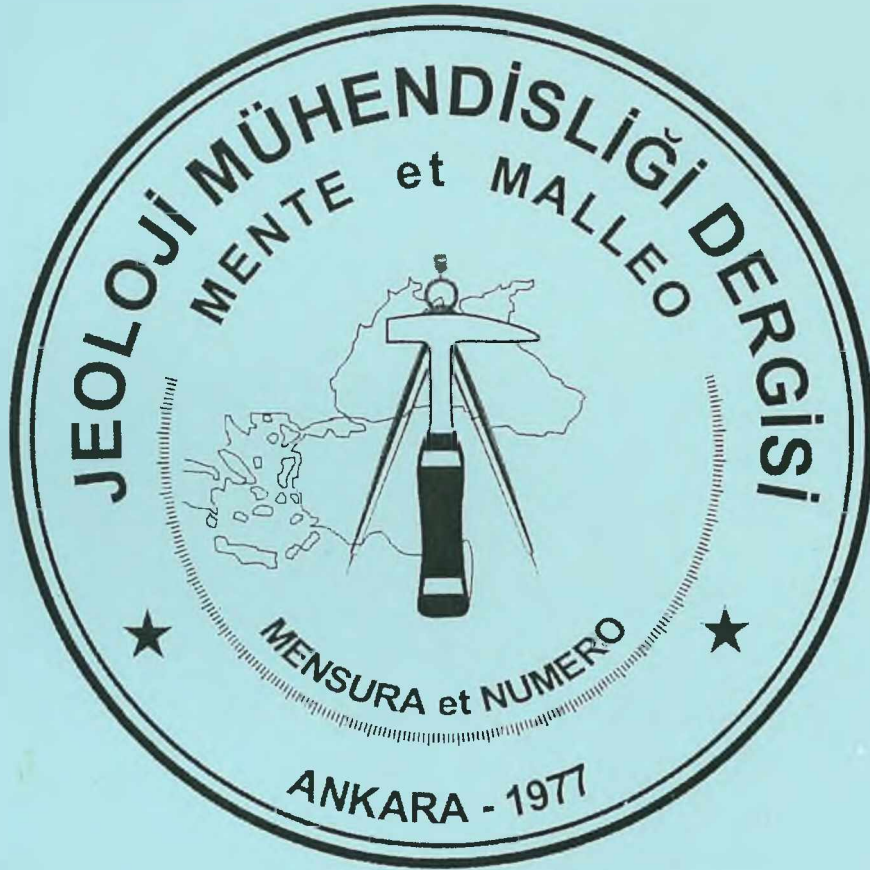
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Geological Engineering Journal

Cilt - Volume 26

ISSN 10116-9172

Sayı - Number 2 - 2002



TMMOB JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

Editörler / Editors

Abidin TEMEL

Hacettepe Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06532 Beytepe – Ankara
Tel: 0312 297 77 55
Fax: 0 312 299 20 34
E-Posta: atemel@hacettepe.edu.tr

Mehmet ŞENER

MTA Genel Müdürlüğü
Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi
Eskişehir yolu, 06520 Ankara
Tel: 0312 2873430/1246
Fax: 0312 286 35 19
E-Posta: mesener@mta.gov.tr

Diğer ÇAĞLAN

MTA Genel Müdürlüğü
Fizibilite Etütleri Dairesi
Eskişehir yolu, 06520 Ankara
Tel: 0312 2873430/2206
Fax: 0312 286 35 19
E-Posta: diincer@mta.gov.tr

Yardımcı Editörler/Assistant Editors

Hüseyin YILMAZ

Cumhuriyet Üniversitesi-Sivas

Sedat TÜRKMEN

Mersin Üniversitesi-Mersin

Yıldırım GÜNGÖR

İstanbul Üniversitesi-İstanbul

Jeoloji Mühendisleri Odası

Chamber of Geological Engineers

Yönetim Kurulu/ Executive Board

Aydın ÇELEBİ / Başkan - *President*

Oktay EKİNCİ / II. Başkan- *Vice President*

İsmet ÇENGİZ / Genel Sekreter- *Secretary General*

Dündar ÇAĞLAN / Sayman- *Treasurer*

Ramazan DEMİRTAŞ / Yayın Üyesi- *Secretary of Publication*

Buket FCEMİŞ / Mesleki Uygulamalar Üyesi- *Professional Application Secretary*

Halice Erbay ÇALAĞAN / Sosyal İlişkiler Üyesi- *Social Affairs Secretary*

Yayın Kurulu / Editorial Board

Musa ALPASLAN (Mersin Üniversitesi)

Kemal AKDAĞ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Fehmi ARIKAN (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Eşref ATABEY (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Serdar BAYARI (Hacettepe Üniversitesi)

Emel BAYHAN (Hacettepe Üniversitesi)

Berk BEŞBELİ (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Muazzez ÇELİK (Selçuk Üniversitesi)

Yavuz ERKAN (Hacettepe Üniversitesi)

Okty EROSKAY (Kültür Üniversitesi)

Yurdal GENÇ (Hacettepe Üniversitesi)

Candan GÖKÇEOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Ergun GÖKTEN (Ankara Üniversitesi)

Fikret KAÇAROĞLU (Cumhuriyet Üniversitesi)

Erçin KASAPOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)

Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)

Mahmut MUTLUÖZ (Süleyman Demirel Üniversitesi)

Eran NAKOMAN (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Nazmi OTLU (Cumhuriyet Üniversitesi)

Ahmet SAĞIROĞLU (Fırat Üniversitesi)

Sönmez SAYIL (Ankara Üniversitesi)

Şakir ŞİMŞEK (Hacettepe Üniversitesi)

Tandoğan ENGİN (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Asuman TÜRKMEENOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Necati TÜYSÜZ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Reşat ULUSAY (Hacettepe Üniversitesi)

Hasan YAZICIGİL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi Makale ve Dizin Özleri
GeoRef ve **Geobase/GeoAbstracts** Uluslararası
Indexler tarafından taranmaktadır.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Geological Engineering Journal

Cilt 26
Volume

Sayı 2-2002
Number

Araştırma Makaleleri / Research Articles

3 - AKAN B.

Jeotermal Sistemlerde Isı Taşımının Modellenmesi

Modeling of Heat Transport in Geothermal Systems

17 - ATILLA A.Ö.

Afyon Ovası Yeraltısuyu Akım Modeli

Groundwater Flow Model of Afyon Plain

31 - AKAN. B.

Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sisteminin Modellenmesi

Modeling of the Afyon Ömer-Gecek Geothermal System

Jeotermal Sistemlerde Isı Taşınımının Modellenmesi

Modeling of Heat Transport in Geothermal Systems

Berrin AKAN

Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, (UKAM), 06532, Bey tepe, Ankara.

Jeotermal sistemler, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sistemlerde,, hidrojeolojik sistemlerden farklı olarak faz değişimleri ve ısı taşınımı da söz konusudur.. Dolayısıyla, böyle karmaşık bir sistemde beslenme-boşalım ilişkisine bağlı olarak meydana gelebilecek değişimleri öngörmek oldukça zordur. Bu aşamada, modelleme yaklaşımı sistemin geleceğine ilişkin bir öngörü yapabilmek açısından büyük bir önem kazanmaktadır. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların niod.ellen.mesi yoğun olarak çalışılan, bir konudur.. Bu modeller, jeotermal alanların kavramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanılmaktadır., Jeotermal sistemlerin modellenmeside esas amaç, rezervuar potansiyelinin belirlenmesi ve reenjeksiyonun sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konması gibi önemli problemlerin çözümüdür. Bu çalışmada, jeotermal sistemlerde ısı taşınımının modellenmesine ilişkin yaklaşımlar¹ kısaca özetlenmiş ve modelleme çalışmalarına temel oluşturan ısı taşınımı eşitlikleri verilmiştir.

Anahtar Kelimeler¹: Isı taşınımı, jeotermal sistemler, modelleme, sıcak su.

ABSTRACT

Geothermal systems are very complex. Apart from the Hydrogeologie systems, these systems include phase change and heat flow. Consequently, its very difficult to suggest variation depend on the discharge and recharge relation in such a complex, system. In this stage, modeling approach is obtained very important role to put forward the future state of the system,. Many advances in simulating fluid flow and heat transport in porous media have recently been made parallel to geothermal energy research.. These models are used to verify and improve conceptual models of geothermal systems.. The main goal of the modeling of geothermal systems is to provide answers to important problems about potential of reservoir and injection effects. In this paper, a summary of heat transport modeling in geothermal systems presented and the governing equations for heat flow briefly described*

Keywords: Heat transport geothermal systems, modeling, hot water.

Giriş

Jeotermal enerji üzerine yapılan araştırmaların artmasına paralel olarak gözenekli ortamlarda ısı taşımının "İDenzeştirilmesi konusunda da büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu modeller, jeotermal alan kavramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanıldığı gibi, rezervuarın potansiyelinin belirlenmesi ve yenilenebilir enerjinin miktarı ve yenilenme hızı konusunda tahmin yapılmasına olanak sağlamaktadır.'

1960'lı yılların sonları ve 1970'li yılların başlarında, jeotermal sistemlerin davranışlarının bilgisayar aracılığı ile benzeştirilmesi konusunda önemli bir çaba sarf edilmiştir. Mercer and Faust (1979), hidrotermal sistemlerde kullanılan matematiksel model yaklaşımlarını değerlendirmişlerdir. Buna göre, jeotermal bir sistemde ilk rezervuar modeli Whiting ve Ramey (1969) tarafından tümsel (lumped) parametre modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Brigham and Morrow (1974) tümsel parametre modelini buhar baskın bir sistemde uygulamışlardır. Mercer et al. (1975), tümsel parametre modelini jeotermal bir sisteme ilk kez uygulamıştır. Faust and Mercer (1975) ve Faust (1976), sonlu, elemanlar ve sonlu farklar tekniklerini çok fazlı akım eşitliklerinde basınç-entalpi formülasyonuna uygulamışlardır. Thomas and Pierson (1976), buhar ve sıvı fazında su içeren jeotermal bir rezervuarı benzeştiren bir model geliştirmişlerdir.

Bodvarsson et al. (1984-a, b, c) ve Pruess et al. (1984), Krafla jeotermal alanında rezervuarın gelecekteki performansını tahmini için detaylı bir modelleme çalışması yapmışlar ve bu çalışmaya ait sonuçları 4 ayrı makalede toplamışlardır. Bunlardan ilkinde kuyularda yapılan test verilerinin, analizi, ikincisinde rezervuarın doğal halinin kavramsal olarak modellenmesi, üçüncüsünde ise rezervuar kapasitesinin belirlenmesine ilişkin çalışmalara ait sonuçlar verilmiştir. Dördüncü makalede tüm bu çalışmaların ışığında, kuyuların ve rezervuarın gelecekteki performansının tahmini için geliştirilen dağınık parametrelili modele ilişkin bilgiler yer almaktadır.

Hopkirk et al. (1985), sıcak kuru kayaların (HDR) ısı rezervuarı olarak performansını tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmiştir. Bu çalışma sırasında, aktif hidrolik sistemlerin zaman içinde değışime eğilimli olduklarını belirlemişlerdir. Bu nedenle, bir modelleme çalışması yaparken zamanla sistemde değışim meydana gelmesine neden olan fiziksel ve mekanik süreçlerin göz önüne alınarak, hidrolik-mekanik ilişkiler, termal-mekanik ilişkiler, hidrolik-kimyasal ilişkilerin dikkatli tanımlanmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

Bodvarsson et al. (1986), modelleme alanında süregelen gelişmeleri de göz önüne alarak, jeotermal rezervuarların modeli emesine yönelik teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında farklı modelleme yaklaşımlarını tanımlamış, bunların avantajı ve limitlerini tartışmışlardır. Kütle ve ısı taşınım eşitliklerinin oluşturulması

ve bunların çözüm teknikleri ile jeotermal rezervuarların modellenmesinde karşılaşılan problemleri ortaya koymuşlardır.

Pruess (1990), jeotermal rezervuarların modellenmesindeki gelişmeler üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, özellikle kırıkla çatlaklı ortamlardaki akım üzerine yoğunlaşarak jeotermal rezervuar modelenmesinde kullanılan yöntemleri gözden geçirmiştir, özellikle bazı alanların modellenmesi üzerine sayısal benzeşim uygulamaları ile ilgili incelemeler yapmıştır.

Kolditz (1995), kırık ve çatlaklı kristallen kayaçlarda, suyun hareketi ile üç boyutlu advectif-kondüktif ısı taşımının incelemiştir. Bu çalışma kapsamında,, Fransa. Alsace Solutz-Sous-Foretş bölgesindeki sıcak kuru kayaçlarda (HDR) bir model çalışması yapılmıştır. Model kurulurken, benzeştirilen HDR rezervuarları odaki akım ve advectif taşıma yönümlü tektonik kuvvetlerle bağlantılı olan kırıklar boyunca olduğu düşünülmüştür. Bu yüzden, HDR sisteminin geometrik yapısını temsil etmek için, bir deterministik kırık-çatlak model ağı oluşturulmuştur. Daha sonra kayacın kırık ve çatlaklarındaki akım ve taşımının tanımlanması için, kırıkla çatlaklı gözenekli ortamı temsil eden fiziksel ve matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Pfister et al. (1997), Bursa Gemlik-Orhangazi bölgesinde yeraltısuyu akımı ve ısı taşımına ilişkin bir model çalışması yapmış ve bölgenin jeotermal durumunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada,, jeotermal sistemler, ısı taşımını ve jeotermal sistemlerin modellenmesine ilişkin genel bir bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Özellikle yabancı literatürde jeotermal sistemlerin modellenmesine ilişkin pek çok çalışma bulunmasına rağmen,, jeotermal sistemlerin bileşenleri, ısı taşımını,, jeotermal sistemlerde kavramsal modellerin geliştirilmesi ve bunların matematiksel modellere aktarılması ve jeotermal sistemlerin modellenmesi sırasında ihtiyaç duyulan sistem parametrelerinin belirlenmesine ilişkin bilgileri bir arada sunan bir çalışmanın eksikliği hissedilmektedir. Bu çalışma ile bu konudaki boşluğun doldurulması hedeflenmiştir.

Jeotermal Sistemler

Jeotermal enerji, genel anlamıyla yerkürenin sahip olduğu doğal ısı olarak tanımlanabilir. Bu ısının kaynağı yerkürenin iç yapısı, ve burada, gelişen fiziksel süreçlerle ilişkilidir. Jeotermal sistemler başlıca, üç ana başlık altında sınıflandırılabilirler Bunlar hidrotermal sistemler,, jeobasinçli (geopressured) sistemler ve sıcak kuru kaya (hot dry rock) sistemleridir. Hidrotermal sistemler, bünyesinde akışkan bulunduran jeotermal sistemlerdir. Bu sistemlerde kendi içerisinde buhar ağırlıklı ve sıvı ağırlıklı sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Buhar ağırlıklı sistemlerde, sıvı ile buhar birlikte bulunmalarına rağmen, rezervuar boyunca süreklilik gösteren ve basıncı kontrol eden faz buhar fazıdır. Sıvı ağırlıklı sistemlerde ise, rezervuarda süreklilik gösteren ve ba-

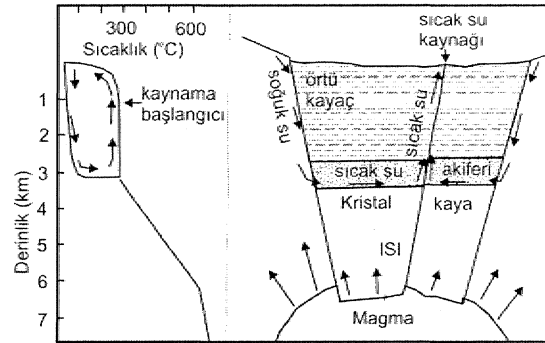
sıncı • kontrol eden faz sıvı fazıdır. Jeobasınçlı sistemler hidrostatik basıncın çok üzerinde akışkan içeren kay aç] ardan oluşan sistemlerdir. Bu sistemler genellikle geçirimsizliği yüksek olan bir örtü kaya ile kaplı olan zonlardan oluşmaktadırlar. Geçirimsiz örtü kaya etkisiyle sistemde sıkışan akışkan, basınç gradyanının etkisi ile yükselerek yüzeye ulaşmaktadır. Sıcak kuru kaya sistemleri ise, ısı taşıyıcı ortam olan suyu içermeyen sistemlerdir (Grant et al., 1982).

Isı Taşımını

Jeotermal bir sistemde, termal akiferin incelenmesi sırasında yeraltısuyu akımı, ısı taşınımı ve kütle taşımını run birlikte değerlendirilmesi gerekir. Soğuk sistemlerde yeraltısuyunun sahip olduğu enerji hidrolik yük olarak ifade edilmektedir. Bu sistemler izotermal sistemler olarak kabul edilmektedir. Termal akifer sistemlerinde,, yeraltısuyu hareketi ile birlikte ısı taşınımı söz konusudur. Soğuk su sistemi erinde büyük çoğunlukla suyun kendi sinden faydalanırken, sıcak su sistemlerinde ısısından da faydalanılmaktadır. Bu nedenle, beslenme-boşalım bölgelerinin arasında ısı dinamiğinin tanımlanması,, söz konusu sistemin ısısından faydalanılarak işletilmesinde büyük önem taşımaktadır.

Bir jeotermal sistem; ısı kaynağı, bünyesinde büyük miktarda su ve buharı tutabilecek bir akifer, ısı ve-buhar kaybını önleyen bir örtü kay aç ve akifere su sağlayan bir beslenme kaynağından oluşmaktadır. Şekil F de görüldüğü gibi bu tür sistemlerde so-

ğuk su; faylar, kırık-çatlaklar ve geçirimi! özellikteki kayalar aracılığıyla yeraltına süzülme,, burada magmatik sokulumlarla temasa geçerek ısınmakta ve faylar aracılığıyla veya alçalan soğuk su ile yükselen sıcak, su arasındaki yoğunluk farkından oluşan basınç kuvveti ile yükselmektedir. Ancak çoğu zaman jeotermal sistemlerde ısı taşınımı magma ile temas eden suyun sirkülasyonu ile olmaz, aynı zamanda manto ve kabuktan yeryüzüne doğru bir ısı taşınımı da söz konusudur (Grant et al., 1982).



Şekil 1.. White (1967)'ye göre jeotermal bir sistemde akışkanın doğal sirkülasyonu (Grant et al., 1982)

Figure 1.. Model by White (1967) of large-scale circulation of fluid in the natural state of a geothermal system» (Grant et al., 1982)

Jeotermal sistemlerde ısının başlıca kaynağı magmatik sokulumlardır. Diğer olası ısı kaynakları ise,, kabuksal kayalarda bulunan yüksek miktardaki radyasyon,, ekso-termik kimyasal reaksiyonlar, erimiş kayaların katılaşması veya kristalleşmesi sırasında açığa çıkan ısı ve faylar aracılığı ile yükselerek akifere giren sıcak magmatik gazlardır (Armstead,, 1978). Jeotermal bir

sistemde ısı, kondüksiyon, konveksi yon ve radyasyon yoluyla olmak üzere üç yolla taşınmaktadır. Kondüktif taşınım,, ısının herhangi bir taşıyıcı ajan olmaksızın sıcaklık gradyanına bağlı olarak doğrudan iletimidir,. Konvektif ısı taşınım,, ısının yeraltı suyu hareketi ile taşınımıdır. Radyasyon ise, bir kütlenin sıcaklığından dolayı yaydığı enerjidir (Domenico and Schwartz, 1990).

Kondüktif taşınım

Kondüksiyon, moleküler titreşim nedeniyle komşu moleküllerin çarpışması yoluyla ortaya çıkan ısı aktarıcıdır. Kondüksiyon yoluyla ısı akımı, sıcaklık farklılığının bir sonucudur. Sıcaklığın yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere ısının kondüksiyon yoluyla taşınımı Fourier yasası'ile ifade edilir,. Belirli bir Az mesafesinde sıcaklıkta meydana gelen değişim, termal gradyan (T.G.) olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir :

$$T.G. = -\frac{T_2 - T_1}{\Delta z} = \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (i)$$

Birim zamanda birim alandan geçen ısı enerjisi ise, ısı akısı (qn) olarak adlandırılır, ısı akısı termal gradyan ile orantılıdır;

$$q_n = -K \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

Burada K; termal iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. Termal iletkenlik (W/mK), birim termal gradyan altında birim zamanda birim alandan geçen ısı akımıdır.

Konvektif taşınım

Genel anlamıyla konveksiyon, sıcak suyun hareketiyle ısının taşınımıdır.

Jeotermal sistemlerde genellikle akışkanın hareketine bağlı olarak konvektif taşınım meydana gelir. Eğer suyun hareketi pompalama gibi dışarıdan etki eden bazı kuvvetlerin etkisiyle oluşuyorsa,, bu tür taşınım zorunlu konvektif (forced convective) taşınım denir. Diğer bir taşınım türü de serbest konvektif (free convective) taşınım olarak adlandırılır. Sıcaklık farkından kaynaklanan yoğunluk değişimi ile ortaya çıkan su hareketi ile ısı taşınımına doğal veya serbest (free) konveksiyon denir.. Bu tip taşınım, akışkan boşalımının buhar veya sıcak su şeklinde gözlemlendiği hidrotermal sistemlerde baskın olarak gözlenmektedir (Domenico and Schwartz, 1990). Bear (1972)'ye göre bu tip ortamlarda yeraltı suyu hareketini temsil eden eşitlik şu şekli almaktadır:

$$v = -\frac{k}{\eta \mu} \frac{dp}{dz} + \frac{\rho g}{\mu} [i - \alpha_f (T - T_0)] \Delta z \quad (3)$$

v:hız(L/t), n:porozite, porreferans yoğunluğu(M/L³), η :viskozite(L²/t), α_f :suyun hacimsel genleşme katsayısı, p:basınç(M/L²), g: yerçekî mi ivmesi(L/t²), k : ortamın permeabilitesi (L²/t) dir (L:uzunluk, t:zaman, M:kütle). Eğer basınç dağılımı hidrostatik ise, $\frac{dp}{dz} = -\rho g$ olarak ifade edilir ve bir önceki eşitlik aşağıdaki gibi olur:

$$v = \frac{\rho g}{\mu} \alpha_f (T - T_0) \Delta z \quad (4)$$

Akımın yatay olduğu yerde,, $3z/3x=I$ dir. po.ga,f(T-l o) değeri akışkanın birim hacmine etki eden kuvvettir. Akışkan hareketinin Darcy Yasası ile ifade, edilebildiği ortamlarda ısı akısı denklemi şöyle ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} q_H x &= -K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + n p_w c_w T v_x \\ q_H y &= -K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + n p_w c_w T v_y \\ q_H z &= -K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + n p_w c_w T v_z \end{aligned} \quad (5)$$

c_w : akışkanın özgül ısı, K_e : etkin termal iletkenlik, ρ : akışkanın sıcaklığında 1°C artış meydana getirmek için gerekli olan ısı miktarıdır ve birimi cal/g°C dir. $n p_w c_w$ ise birim: hacimdeki akışkanın ısı kapasitesidir. Sıvı ve katıdan oluşan iki fazın karışımında her ikisi-de iletken'ise,-etkin-termal iletkenlik,, şu şekilde ifade edilmektedir:- ' .

Bu eşitlikte f; sıvılar için, s; katılar için termal iletkenlik katsayısını ifade. etmektedir. Sıvı ve katıdan oluşan' iki fazın özgül ısı 'kapasitesi ise etkin ısı kapasitesi (pV) olarak-adlandırılır ve şöyle ifade edilir:

$$pV = \rho p_w c_w + (1 - n) p_s c_s \quad (7)$$

Izotropik şartlar için Eş. 5 aşağıdaki 'şekle dönüşmektedir;;

$$q_H = -K_e \text{grad } T + n p_w c_w T v \quad (8)$$

v : v_x, v_y, v_z bileşenlerinden oluşan bir vektördür.,

Kondüksiyon-Konveksiyon eşitliği

Kondüksiyon ve konveksiyon şu eşitlikle tanımlanır:

$$-\text{div} H = -\text{div}[-K_e \text{grad } T + n p_w c_w T v] = -S T \quad (9)$$

veya K_e, n, p_w ve c_w 'nin sabit olduğu varsayımından;

$$K_e \nabla^2 T - n p_w c_w \text{div}(T v) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Dengeli yeraltı suyu akımında $v=0$ olduğundan;

$$K_e \nabla^2 T - n p_w c_w \text{div}(T v) = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

Eğer-hız 0 ise kondüksiyon yolu ile iletini zayıftır. Sıcaklık dengeli ise;

$$K_e \nabla^2 T - n p_w c_w \text{div}(T v) = 0 \quad (12)$$

Bu eşitlik kondüksiyon-konveksiyon eşitliği olarak adlandırılır. Eş. 10'un tek boyutlu hali aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:'

$$K_e \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - n p_w c_w \frac{dT}{dx} = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (13)$$

Jeotermal Bir Sistemin Kavramsal Modelinin Geliştirilmesi

Jeotermal bir sistemde meydana gelen süreçlerin ortaya konabilmesi için önemli aşamalardan biri kavramsal modelin oluşturulmasıdır. 'Jeotermal bir' sistemin yorumlanması, araştırmacıml. rezervuar hakkında oluşturduğu kavramsal resim, araştırma peri-

yodu sırasında etkin olan fiziksel süreçler ve ölçüm ve yorumlar' sonucunda elde edilen verilerin kalitesiyle yakından ilgilidir.. Jeotermal sistemlerin yorumlanması sırasında karşılaşılan • en önemli problem, rezervuann yerin-kilometrelerce altında yer alması nedeniyle sondaj ve ölçümlerin oldukça yüksek maliyetli olmasıdır. Bu nedenle bir jeotermal sahanın kavramsal modeli oluşturulurken açılacak sondajların sayısı araştırmanın bütçesi ile sınırlı kalmaktadır.,

Jeotermal sistemlerde kavramsal modelin geliştirilmesi, farklı disiplinlerarası bir iş birliği gerektirmektedir., örneğin; jeotermal sistemlerin modellenmesinde yeraltı suyu ve petrol rezervuarlarına ilişkin teori ve teknikler birlikte kullanılmaktadır.

Jeotermal bir sistemin kavramsal modelinin oluşturulmasında en önemli süreç harita! amadır., Rezervuara ait şu özelliklerin harita olarak gösterimi... yorumlama açısından büyük kolaylık sağlayacaktır:

- > Rezervuar jeolojisi
- > Yüzey"ve yüzeyaltı jeofizik verileri
- > Rezervuara ait sıcaklık dağılımı
- > Rezervuara ait basınç dağılımı
- > Düşey basınç gradyan dağılımı
- y Perméabilité dağılımı
- y Kimyasal veriler
- > Doğal boşalimler
- y Hidrotermal alterasyon zonları
- > Kuyuların debileri
- > Yeraltı seviye değişimleri

Bu listede yer alan özelliklerin tamamı tüm. rezervuar tipleri için gerekli değildir ve elde edilmesi mümkün olmayabilir., Ancak

oluşturulacak kavramsal • modelin gerçeğe yakınlığı bu, listede yer alan özelliklere ait bilgilerin elde bulunması ve yorumlanması ile doğru orantılıdır (Grant, et al, 1982).

Isı taşınımı "modellerine yönelik olarak yapılan jeotermal araştırmalarda elde edilmesi gereken en önemli veri basınç ve sıcaklığın Basınç ve sıcaklığın zamana, yere • ve derinliğe göre değişimi rezervuara ilişkin • önemli bilgiler vermektedir., Bu durum göz önüne alınarak inceleme alanında yer alan 'kuyularda basınç ve sıcaklık testleri yapılarak, sıcaklığın ve basıncın derinliğe ve zamana bağlı değişimi ortaya konmalıdır. Bu' nun için kuyularda statik sıcaklık, dinamik sıcaklık, statik basınç,, dinamik basınç ve basınç toparlanma (pressure build-up) testleri yapılmalı, ve bu testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek model alanında yatay ve düşey yöndeki basınç ve sıcaklık profilleri oluşturulmalıdır. Ayrıca, basınç toparlanma testlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda " rezervuara ait perméabilité değerinin; belirlenmesi de mümkündür (Akan, 2002)." Ancak kuyu dibinden alınan sıcaklık ve basınç" ölçümleri, tam olarak rezervuann sıcaklık ve basıncını yansıtmamaktadır., Bu nedenle basınç ve sıcaklık, ölçümleri farklı derinliklerdeki kuyulardan alınarak dikkatle yorumlanmalıdır.

Akışkanın kimyasal içeriği de rezervuar hakkında bilgi veren önemli bir parametredir.. Model alanlıda yer alan kuyu ve kaynaklardan toplanan termal suyun kimyasal analiz.sonuçları, termal suyun kökeni, dolaşım mekanizması ve yüzeye çıkış koşulları ile ilgili bilgi vermektedir.. Dolayısıyla, kav-

ramsal model oluşturulurken, termal sulara ait kimyasal türlerin zamana ve konuma bağlı değişimlerini karakterize edecek şekilde planlanmış bir liidrökimya çalışması yapılması büyük yarar sağlamaktadır.

Sonuç olarak kavramsal modelin geliştirilmesi sırasında jeotermal sisteme ait yukarıda bahsedilen veriler derlenerek sistemi oluşturan ısı kaynağı, rezervuar kayaç, örtü kayaç ve beslenme bölgesi tanımlanmalıdır. Bu sistem içerisinde termal suyun akış yönü ve yüzeye çıkış mekanizması ortaya konmalıdır.

Jeotermal Sistemlerin Modellenmesi

Jeotermal enerji üzerine yapılan araştırmaların artmasına paralel olarak gözenekli ortamlarda tek. ve iki fazlı akışkan akımı ve ısı taşı mim nın benzeştirilmesi konusunda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu modeller,, jeotermal alanların kavramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanıldığı gibi, rezervuann potansiyelinin belirlenmesi ve yenilenebilir enerjinin miktarı ve yenilenme hızı konusunda tahmin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Jeotermal sistemlerin modellenmesinde çekilme eğrisi analizi, tümsel parametre modelleri ve dağınık parametre modelleri olmak üzere başlıca üç tip model kullanılmaktadır. Çekilme eğrisi analizi, kuyularda gözlenen kuyu debisi çekilmesine **uygun** cebirsel eşitlikler oluşturularak gelecekteki kuyu. debisi çekilmelerinin tahmin edilmesi esasına dayanmaktadır.

Tahmin edilen debi çekilmelerinden hareket edilerek gelecekte ihtiyaç duyulacak ilave kuyu sayı sını nı n belirlenmesi mümkündür. Tümsel parametre modelleri, ana rezervuar ve beslendiği katmanı n modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu tip modeller için geliştirilen eşitlikler yan analitik olarak çözülebilen diferansiyel eşitliklerdir. Tümsel parametre modelleri ile ortalama rezervuar basıncı ve akışkanın entalpisi hakkında geleceğe yönelik tahminler yapmak mümkündür,. Tümsel parametre modelleri genellikle basıncı ve akışkanın entalpisi de göre kalibre edilir. Tümsel parametre modellerinin başlıca avantajı basit olması ve çok güçlü, bilgisayarlara ihtiyaç duymamasıdır. Bazı dezavantajları ise (1) Rezervuardaki akışkan akımını dikkate almaması ve rezervuar özelliklerindeki değişimi göz ardı etmesi, (2) Grid-blok boyutlarının büyüklüğünden dolayı akışkanın yoğun! aşmayan gaz içeriği ve ortalama entalpiyi yansıtmaması, (3) Kuyular arası mesafe ve enjeksiyon kuyusunun yeri ile ilgili soruların cevaplayamamasıdır. Dağınık parametre modelleri ise, rezervuann az veya çok sayıda gride bölünerek benzeştirilebildiği çok genel modellerdir. Bu tür modeller, jeotermal. sistemin rezervuar, örtü kaya, temel kaya gibi bileşenleri ile beslenme alanı ve sığ soğuksu, **akiferlerinin** modellenmesinde kullanılmaktadırlar. Dağınık parametre modelleri, kayaç özelliklerine bağımlı parametreler ve termodinamik koşulların tanımlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Dağınık parametre modellerinin başlıca avantajı,, tüm matematiksel yapı bilgisayar kodundadır, kullanıcıya simülasyonun hangi detayda ola-

cağına ve hangi fiziksel süreçlerin gözönüne alınacağına dair karar verme imkanı vermektedir. Bu tip modellerin dezavantajı ise bir bilgisayar ve deneyimli bir modelciye ihtiyaç duyulmasıdır (Bodvarsson et al., 1986).

Jeotermal sistemlerin doğal yapısı oldukça dinamiktir. Akışkan, ısı ve kimyasal türlerin sürekli bir taşınımı söz konusudur. Jeotermal sistemlerdeki önemli fiziksel süreçler; kütle taşınımı, konvektif ve kondüktif ısı taşınımı, faz değişimleri (kaynama ve yoğunlaşma) minerallerin, çözülme ve çökelmesidir. Bu süreçler, kayaçların perméabilite ve porozitesini değiştirmektedir.

Jeotermal rezervuarların modellemesinde, hangi fiziksel süreçlerin dikkate alınacağı titizlikle değerlendirilmelidir. Bu çalışmanın amacı ve jeotermal sistemin karmaşıklığına bağlıdır. Günümüzdeki birçok jeotermal model, tek bileşenli ısı ve kütle taşınımına dikkate alır. Ancak, son yıllarda ikinci bileşenin taşınımını modelleyebilen modeller geliştirilmiştir.

Isının hareketini tanımlamak için, ısı taşınım eşitliği ve yeraltı suyu taşınım eşitliği birlikte çözülmelidir. Gözenekli ortamlarda ısı taşınımını ifade eden eşitlik ısı-enerji dengesi ile elde edilebilir. Isı taşınımının modellenmesinde kullanılan genel ısı dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Mercer et al., 1982).

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho c_f + (1-n)\rho_s c_s)r = v[nK_f + (1-n)]p_s NT +$$

$$V \cdot w D_A VT - V \cdot n p_c v T + q_h + q p^* c_f T^*$$

Burada,

T akışkan ve gözenekli ortamın sıcaklığı (T)

T* sabit akışkan girdisinin sıcaklığı (T)

ρ_s katı fazın yoğunluğu (M/L³)

Cf sabit basınçtaki akışkan fazının özgül ısı (E/MT)

c_s sabit basınçtaki katı fazın özgül ısı (E/MT)

Kf sıvı fazın termal iletkenliği (E/LtT)

Ks katı fazın termal iletkenliği (E/LtT)

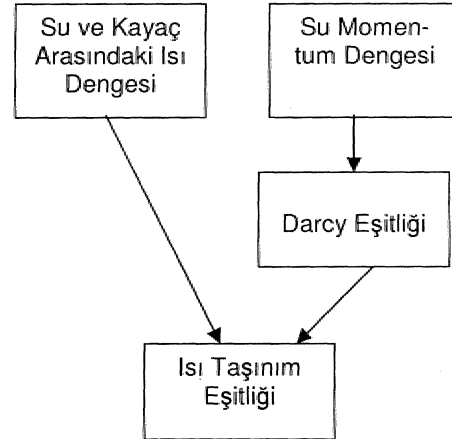
Dh termo mekanik, dispersiyon tensörü (E/LtT)

q_h ısı kaynağı oransal yoğunluğu (E/L³t).

I birim matris (-)

E=ML²/t²

Yukandaki eşitlik su ve kayaç arasındaki termal denge varsayımı gözönüne alınarak (üretilmektedir (Şekil 2)). Gözenekli bir ortamda suyun hareketinin, yavaş ve su-kayaç dokanağının meydana geldiği yüzey alanının geniş olduğu gözönüne alınırsa, termal dengeye ulaşılması mümkün görülmektedir.



Şekil. 2* Isı taşınım eşitliğinin ana bileşenleri (Mercer and Faust, 1980)

Figure 2. Major components of the heat transport equation (Mercer and Faust, 1980)

- Model parametrelerinin belirlenmesi

Isı taşınım modellerinde ihtiyaç duyulan başlıca parametreler sıcaklık, basınç, termal iletkenlik ve özgül ısıdır. Sıcaklık ve basınç, koyularda yapılan statik, sıcaklık ve statik basınç testlerinden elde edilmektedir. Bu testler sırasında kuyularda belirli derinliklerde sıcaklık ve basınç değerleri ölçülmektedir, Kuyularda ölçülen, derinliğe karşılık sıcaklık ve basınç verilerinden yola çıkılarak model alanı içerisinde sıcaklık ve basınç profilinin oluşturulması mümkündür. Isı taşınım modellerinde en önemli parametrelerden biri olan termal iletkenlik değeri ise* iki şekilde ölçülmektedir, birincisi direk arazide ölçüm, diğeri ise alman karot örnekleri ile laboratuvarında ölçümdür., Termal iletkenlik, kayacın yapısı ve mineral kompozisyonu ile kontrol edilir., Yeryüzündeki malzemelerin termal iletkenliği, genellikle suya doygunluk ve basınçla artar,, sıcaklıkla azalır. Termal iletkenliğin laboratuvarında ölçümünde kullanılan başlıca yöntemler; divided-bar,, optical scanning ve • 'half • space line source yöntemleridir. Divided-bar yöntemi, doygun kayacın bir diski (30-50 mm çapında ve 10-30 mm kalınlığında) boyunca meydana gelen sıcaklık düşüşü ile iletkenliği bilinen standart bir malzemenin bir diskinde meydana gelen sıcaklık düşüşünün karşılaştırılmasıdır. Optical scanning yönteminde ise düzenek,, örnek yüzeyini 'tarayan bir odak, hareketli ve sürekli çalışan sabit ısı kaynağı ile birleşmiş bir sıcaklık sensöründen oluşur. Isı kaynağı ve sensör örneğe göre aynı hız ile hareket eder ve birbirine sabit uzaklıktadır.

Ölçümü yapılacak olan örnek ve iletkenliği bilinen bir standart referans tarama yönünde aynı hızdadır ve örneğin ısı iletkenliği standart referans ile karşılaştırma yapılarak ölçülür (Popov et al., 1999).. Arazi ölçümü' ise, kuyularda termal iletkenlik ölçümüne imkan sağlayacak şekilde dizayn edilmiş aletlerle yapılmaktadır. Genelde bu tür aletler, bir ısıtıcı ve bu ısıyı kayalara kondüksiyon yoluyla ileten özel bir sıvı ile dolu gözenekli bir malzemedir oluşur,, kayacın içerisinde zamanla meydana gelen sıcaklık değişimi ise özel sensörler aracılığı ile kaydedilmekte ve böylece kayacın termal iletkenliği ölçülmektedir (Burkhardt et al., 1995).

Özgül ısı kapasitesi kalorimetre adı verilen bir düzenek ile ölçülmektedir. Bu metod, kayacın katı bileşeninin özgül ısı kapasitesini (c_m) izobarik koşullar altında ve oda sıcaklığında (20-25 °C) ölçmektedir (Schärli and Rybach, 2001).

- Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi

Fiziksel bir sürecin kısmi diferansiyel eşitlikler yardımıyla çözümünde, çözümü teke indirmek için bu sürecin fiziksel durumunu yansıtan ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.. Bu bilgi,, başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması ile elde edilebilir. Başlangıç koşulları, bağımlı değişkenin başlangıç anında ($t=0$) sınırlar içerisinde aldığı değeri ifade etmektedir., Matematiksel olarak sınır koşulları, sınırların geometrisini ve bağımlı değişkenlerin sınırlarda aldığı değerleri

kapsamaktadır. Fiziksel anlamda,, yeraltı suyu uygulamalarında sınır koşulları genellikle üç grupta toplanmaktadır, bunlar sabit değer (specified value), sabit akı (specified, flux) ve değışkene bağımlı akı (value-dependent flux)dır (Mercer et. al., 1982),,

Sabit değer sınır koşulu

Dirichlet sınır koşulu, olarak da bilinen sabit'ieğer sınır koşulunda, yeraltısuyu a-kim eşitlikleri için basınç koşulları,, enerji taşınım eşitlikleri için sıcaklık koşulları ve kütle taşınım eşitlikleri için çözelti konsantrasyonu koşulları belirlenir., Bu koşullar, konum ve zamandan bağımsız olarak tanımlanır. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilirler (Kipp, 1987):

$$P=P_B (X, t), x, S_p \text{ için}$$

$$T=T_B (x,t), x, S_T^1 \text{ için,}$$

$$w=W_B (x,t), x, S_w' \text{ için,}$$

p_B sabit sınırdaki basınç değeri (Pa)

T_B sabit sınırdaki sıcaklık değeri (C)

w sabit sınırdaki çözelti konsantrasyonu. (-)

S_p^1 sabit basınç sınırı

S_T^1 sabit sıcaklık sınırı.

S_w sabit konsantrasyon sınırı

Sabit Akı sınır koşulu

Neumann sınır koşulu olarak bilinen, sabit akı sınır koşulunda akışkan, ve ısı akısı, sınırın bir bölümünde zaman ve konumun. fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu sınır koşulunda sisteme giriş olan sınırlarda advektif+dispersif,-sistemden çıkış olan. sınırlarda ise sadece advektif akı söz konusu olmaktadır. • •

Akılara ait eşitlikler şu şekilde ifade edilebilir .(Kipp, 1987):

$$q_n = (q_x \cdot n_x + q_y \cdot n_y + q_z \cdot n_z) \quad x, S_p^2 \text{ için} \quad (15)$$

$$q_{s_n} = (q_x \cdot n_x + q_y \cdot n_y + q_z \cdot n_z) \quad x, S_w^2 \text{ için} \quad (17)$$

q_n sınırdaki akışkan akısının \hat{i} yönündeki bileşeni ($m^3/m^2 \cdot s$)

q_{s_n} sınırdaki ısı akısının \hat{i} yönündeki bileşeni (W/m^2)

q_x, q_y, q_z sınırdaki kütle akısının \hat{i} yönündeki bileşeni ($kg/m^2 \cdot s$)

q_n akışkan akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni ($kg/m^2 \cdot s$)

q_{s_n} ısı akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni (W/m^2)

q_x, q_y, q_z kütle akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni ($kg/nT \cdot s$)

S_w sınırın sırasıyla akışkan, kütle ve ısı akılarının tanımlandığı bölümü,

$u=p, T, w$

Isı iletimi sınır koşulu

Akışkan akımı veya kütle taşınımı olmaksızın sadece ısı iletimi için bir sınır koşulu mevcuttur., Bu sınır koşulu, ısı katkısı veya kaybının benzeştirilmesini mümkün kılmaktadır. Isı akı sınırın, benzeştirme bölgesindeki iletken'ortamın sıcaklık profiline göre belirlenmektedir. Tek boyutlu, iletimin, sınırı o yüzeyine dik olduğu ve etrafındaki malzemenin iletkenliği ise sınıra paralel olduğu farz edilir, çünkü yatay sıcaklık değişimi ihmal edilmektedir. Sınır koşulunu ifade etmek üzere kullanılan tek boyutlu, ısı iletim, eşitliği aşağıdaki gibidir (Kipp, 1987);

$$\rho \cdot c \cdot \frac{d}{dx} T = K \cdot \frac{dT}{dx} \quad (18)$$

$\rho \cdot c$ kuyunun etrafındaki malzemenin birim, hacminin ısı kapasitesi ($J/m^3 \cdot ^\circ C$)

K kuyunun etrafındaki malzemenin ısı iletkenliği ($W/m \cdot ^\circ C$)

T_c kuyunun etrafındaki malzemenin sıcaklığı ($^\circ C$)

z_n sınırın koordinatı

ilksel koşul aşağıdaki şekilde belirlenmektedir;

$$T=0 \text{ için } T_c = T_c(z_n)$$

T_c ilksel sıcaklık profili ($^\circ C$)

Sınır koşulları,

$$z_n=0, T_c = T_B(t) \quad (19)$$

$$z_n = b_{HC}, T_c = T_c^0(b_{HC}) \quad (20)$$

T_B akifer sınırında sınır sıcaklığı ($^\circ C$)

b_{HC} bölgenin dışındaki iletken ortamın etki o kalınlığı (m)

Isı taşınım modellerinde, model için belirleyici sınır koşulları sıcaklık ve basınçtaki değişimi ifade eden sabit sıcaklık ve sabit basınç sınır koşullarıdır. Örneğin, model alanında yer alan ısı kaynağı ve sıcak su akiferinin soğuksu akiferi ile temas ettiği sınırlar sabit sıcaklık sınırı, beslenmenin meydana geldiği sınırlar ise sabit basınç sınırı olarak tanımlanmaktadır.

Başlangıç koşullarının, tanımlanmasında ise, jeotermal alanda yer alan kuyularda yapılan basınç ve sıcaklık testlerinden yararlanmak mümkündür. Bu testler sonucunda elde edilen statik sıcaklık ve statik basınç

değerlerinden yararlanılarak model alanındaki sıcaklık ve basınç dağılımları elde edilerek, bu değerler in odelde başlan gı ç sıcaklık ve basınç değerleri olarak kullanılmaktadır.

Sonuçlar

Jeotermal sistemler, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sistemlerde,, hidrojeolojik sistemlerden farklı olarak faz değişimleri, ve ısı taşınım da söz konusudur,. Dolayısıyla, böyle karmaşık bir sistemde beslenme-boşalım ilişkisine bağlı olarak meydana gelebilecek, değişimleri öngörmek amacıyla modelleme yaklaşımının kullanılması avantaj sağlamaktadır, Termal akifer sistemlerinde, yeraltısuyu hareketi ile birlikte ısı taşınımını söz konusudur., Soğuk su sistemlerinde büyük çoğunlukla suyun kendisinden faydalanılırken, sıcak su sistemlerinde ısısından da faydalanılmaktadır. Bu nedenle, beslenme-boşalım bölgelerinin arası nda ısı dinamiğinin tanımlanması, söz konusu sistemin ısısından faydalanılarak işletilmesinde büyük önem taşımaktadır. Jeotermal bir sistemde ısı, kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon yoluyla olmak üzere üç yolla taşınmaktadır. Kondüktif taşınım, ısının herhangi bir taşıyıcı ajan olmaksızın sıcaklık gradyanına bağlı olarak doğrudan iletimidir. Konvektif ısı taşınımı, ısının yeraltısuyu hareketi ile taşınır, Radyasyon ise, bir kütlein sıcaklığından dolayı yaydığı enerjidir., Jeotermal sistemlerin modellenmesinde çekilme eğrisi analizi, tümsel parametre modelleri ve dağılık pa-

rametre modelleri olmak üzere başlıca üç tip model kullanılmaktadır., Jeotermal sistemlerin modellenmesinde en önemli aşamalardan biri sistemin kavramsal modelinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan bu kavramsal model, matematiksel bir takım denklemler yardımıyla matematiksel modele aktarılmaktadır.. Fiziksel bir sürecin kısmi diferansiyel eşitlikler yardımıyla çözümünde,, çözümlü teke indirgemek için bu sürecin fiziksel durumunu yansıtan ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgi, başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması ile elde edilebilir.. Başlangıç koşulları,, bağımlı değişkenin başlangıç anında sınırlar içerisinde aldığı değeri ifade etmektedir. Matematiksel olarak, sınır koşulları ise, sınırların geometrisini ve bağımlı değişkenlerin sınırlarda aldığı değerleri kapsamaktadır, Isı taşınımı modellerinde, model için belirleyici sınır koşulları sıcaklık ve basınçtaki değişimi ifade eden .sabit sıcaklık ve sabit, basınç sınır koşullarıdır. Sonuç olarak, jeotermal sistemlerin modellenmesi, rezervuar potansiyelinin belirlenmesi ve reenjeksiyonun sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konması gibi önemli problemlerin çözümünde yol gösterici olmaktadır. Jeotermal sisteme ait güvenilir ve temsil edici verilerle oluşturulmuş bir model sisteme ilişkin önemli bilgiler ortaya koymaktadır., Dolayısıyla sisteme ait verilerin sayısı ve kalitesi arttıkça modelin güvenilirliği de artmaktadır.,

Değinilen Belgeler

- 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).
- Armstead, C.H., 1978. Geothermal Energy.. Its past,, present and future contributions to the energy needs of man., E&F.N. Spon Ltd., London, 357 p.
- Bear, J., 1972., Dynamics of Fluids in Porous Media., New York,, American Else vier Publishing Company, Inc., 764 p.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., and Lippmann, M.J., 1986.. Modeling of Geothermal Systems. Journal of Petroleum Technology, September, 1986, 1007-1021.,
- Bodvarsson, G.S., Benson, S.M., Sigurdsson, O., Stefansson, V., and Eliasson, E.T., 1984-a. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 1. Analysis of Well Test Data. Water Resources Research, 20 (11), 1515-1530.,
- Bodvarsson,, G.,S., Pruess, K., Stefansson, V., and Eliasson, E.T., 1984-b. The Krafla Geothermal Field,, Iceland: 2. The Natural State of the System. Water Resources Research, 20(11), 1531-1544.
- Bodvarsson, G.S., Pruess,, K., Stefansson, V., and Eliasson, E.T., 1984-c. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 3. The Generating Capacity of the Field., Water Resources Research, 20 (11), 1545-İ 559.
- Brigham, W.E., and Morrow; W.B., 1974. P/Z Behavior for Geothermal Steam Reservoirs. Paper SPE 4899 presented at the 44th Annual California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, AME, San. Francisco, California.
- Burkhardt, H., Honarmand, H., and Pribnow,, D., 1995., JTest Measurement With a New Thermal Conductivity Borehole Tool. Tectonophysics, 244, 161-165.
- Domenico,. P.A., and Schwartz, F.W., 1990., Physical and Chemical Hydrogeology., John Wiley&Sons, Canada, 317-357.

- Faust, C.R. and Mercer, J.W., 1975. Mathematical Modeling of Geothermal Systems. In: Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, California, 3, 1633-1642..
- Faust, C.R., 1976.. Numerical Simulation of Fluid Flow and Energy Transport in Liquid and Vapor-Dominated Hydrothermal Systems. PhD Thesis, Pennsylvania State University,, University Park, Pennsylvania (unpublished).
- Grant, .MA., Donaldson, I.G. and Bixley, P.F., 1982. Geothermal Reservoir Engineering. Academic Press,, New York, 369 p.
- Hopkirk, R.J., Gilby, D.J., Rybach, L., and Griesser, J.C., 1985. Modeling of Heat and Mass Transfer in Deep,, Fractured Crystalline Rock. Geothermics, 14 (2/3), 385-392..
- 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 p.
- Kolditz, G., 1995. Modeling Flow and Heat Transfer in Fractured Rocks: Conceptual Model of a 3-D Deterministic Fracture Network. Geothermics, 24, (3), 451-470.
- Mercer, J.W., Pinder, G.F., and Donaldson, I.G., 1975., A Galerkin finite element analysis of the hydrothermal system at Wairakei, New Zealand.. I. Geophys. Res.,, 80 (17), 2608-2621.
- Mercer, J.W., and Faust, C.R., 1979. A review of Numerical Simulation of Hydrothermal Systems. Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, 24 (3), 9/1979,335-343;
- Mercer, J.W., and Faust, C.R., 1980., Ground-water modeling: Mathematical models-Ground Water, 18 (3), 212-227..
- Mercer, J.W., Faust, C.R., W.J., Miller and F.J. Pearson, JR, 1982.. Review of Simulation Techniques for Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Advances in Hydro-science, 13, 1-129,
- Pfister. M., Rybach, L., and Şimşek, Ş., 1997.. Geothermal Reconnaissance of the Marmara Sea Region. Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project,, A. Multidisciplinary Approach by Space-Geodesy, Geology, Hydrogeology, Geothermics • and Seismology, vdf Hochschul verlag A G an der ETH Zürich, ISBN 3-7281 -2425-7.
- Popov, A..Y., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams,, CF.,, and Burkharde H., 1999, Characterization of Rock Thermal Conductivity by High-Resolution optical. Scanning« Geothermics, 28, 253-276.
- Pruess, K., Bodvarsson, G.S., Stefansson, V., and Eliasson, E.T., 1984, The Krafla Geothermal Field, Iceland: 4., History Match and Prediction of Individual Well Performance. Water Resources Research,, 20 (11), 1561-1584.
- Pruess, EL, 1990. Modeling of Geothermal Reservoirs: Fundamental Processes,, Computer Simulation and Field Applications,, Geothermics, 19(1), 3-15.
- Schärli, IL, and Rybach,, L., 2001.. Détermination of Specific Heat Capacity on Rock. Fragments.. Geothermics, 30, 93-110.
- Thomas, L.K., and Pierson, R., 1976. Three-Dimensional Geothermal Reservoir Simulation of Geothermal Reservoir Simulation. Paper SPE6104 Presented, at the 51st Annual Fall Meeting, of the Society of Petroleum. Engineers, AIME, New Orleans,, Louisiana.,
- White, D.E., 1967., Some principles of Geyser Activity, Mainly From Steamboat Springs, Nevada,. Am. J. Sei.,, 265,, 641-684..
- Whiting, D.E., and Ramey, HJ., Jr, 1969.. Application of Material and. Energy Balances to Geothermal Steam Production, J. Petrol.. Tech.,, 21 (7),, 893-900.

Afyon Ovası Yeraltısuyu Akım Modeli

Groundwater Flow Model of Afyon Plain

A. Özlem ATILLA

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, 06532 Ankara

ÖZ

Afyon Ovasında geçtiğimiz bir kaç oo yıl içinde artan gereksinime bağlı olarak git-tikçe •artan miktarlarda yeraltısuyu çekilmiş ve bu uygulamaya- paralel olarak piyezometrik seviyede düşümler ve su kalitesinde bozulmalar gözlenmiştir. Bu koşullar altında ovada yoğun olarak çekimin artması sonucu meydana gelecek etkilerin öngörül-mesi, ovadaki yeraltısuyu konumunun bugünkü durumunun ortaya konması ile mümkün olabilecektir.. Bu amaca yönelik olarak, ovadaki yeraltısuyu akımı MODFLOW (Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model) matematiksel modeli aracılığıyla benzeştirilmiş, ovadaki hidrolik yük dağılımının yer ve zaman içindeki yayılımı belirlenmiştir. Ova. genelinde hidrolik yük dağılımı ovanın KB kısmından GD kısmına doğru •azalmaktadır. Benzeşim, sonuçlarında, özellikle çekimin yoğun olarak başladığı. 1976 yılından sonra ve önemli ölçüde arttığı 1990 yılından sonra piyezometrik sevi yer-deki düşüş dikkat çekmektedir,. 1965 yılından 1998 yılına kadar ovanın bazı kesimlerinde 5 - 10 m'lik düşümler olduğu belirlenmiştir, Bu koşullar¹ altında ovada yeraltısuyu kulla-nımının doğal hidrolik denge koşullarını bozmayacak şekilde düzenlenmesi ve kontrolsüz, çekimlerin durdurulması gerekmektedir,.

Anahtar Sözcükler: Afyon, model, MODFLOW, yeraltısuyu

ABSTRACT

- Extensive groundwater exploitation over the last two decades has resulted in piezo-metric level decline and- water quality degradation in the fresh water aquifer in the Afyon Plain., Under these conditions, the prediction of the consequences of the overexploitation requires the identification of the current head distribution. For this purpose, the spatial and temporal extent of the hydraulic head over the plain is simulated by MODFLOW (Modular -three-dimensional-finite-difference ground-water flow model). The hydraulic ' head distribution declines from NW to SE over the plain. The model shows that there is an increase in the decline of the piezometric levels after the year 1976 when an intensive groundwater exploitation is started, and after 1990 when the exploitation is considerably increased.. It is .simulated that the-hydraulic head is decreased 5 to 10 m in some parts of the plain front the year 1965 to 1998. Under these conditions, groundwater usage In the

Plain should be regulated to establish the natural hydraulic balance and, the termination of ike uncontrolled groundwater exploitation.*

Key Words: Afyon, groundwater, model, MOD FLOW

Giriş

Tarım ve hayvancılık açısından önemli bir konuma sahip olan Afyon ilinde so« yıllarda sulanan arazi miktarında artış gözlenmektedir, Ovada soğuk su akiferinden özellikle yaz aylarında sulama ve kullanma amaçlı olarak önemli miktarlarda su çekilmektedir.. Afyon* da yeraltı suyu kol lamı ağırlıklı olarak 1990 yılından itibaren artmaya başlamıştır. Ayrıca yoğun çekimin bir sonucu olarak da piyezometrik seviyede 60 m¹ ye varan düşümler gözlenmiştir. Özellikle 100 m'den daha derin işletme kuyularının bulunduğu alanlarda piyezometrik seviyedeki düşümlerin yanısıra sulama suyu kalitesinin de bozulduğu görülmektedir. Termal akifer sisteminden kaynaklandığı düşünülen bu kalite bozulmaları,, sıcak suları karakterize eden Na, Cl,, Li, Br vb. kimyasal parametrelere soğuk su kuyularında da yüksek oranlarda rastlanması ile belirlenmiştir (Atila, 2002)..

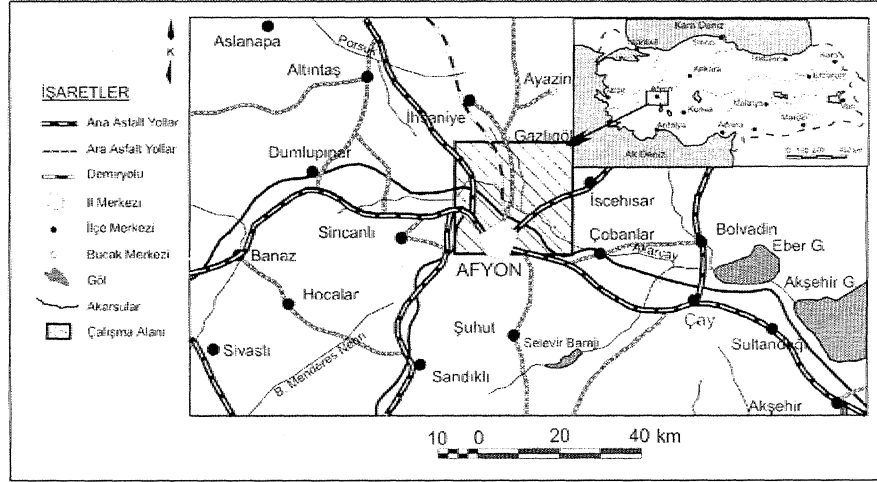
Ovada yoğun olarak çekimin artması sonucu meydana gelecek etkilerin öngörülmesi amacı ile, ovadaki yeraltısuyu akımı McDonald and Harbaugh (1988) ve Harbaugh and McDonald (1996) tarafından geliştirilen MODFLOW model programının geliştirilmiş sürümü olan MODFLOW-2000 (Harbaugh et al.,, 2000) ile benzeştirilmiştir. Beslenme - boşalım ilişkileri, sınır koşulların etkileri bu model ile ortaya konmuştur., Mo-

del süresi yeraltısuyu kullanımının başladığı 1966 yılından 1 yıl öncesinde (1965) başlatılmış,, seviye ve kalite gözlemlerinin yapıldığı 1998 yılına kadar sürdürülmüştür., Modelde zaman, birimi gün olarak seçilmiştir. Modelin kalibrasyonunda evrik model ine yöntemi uygulanmıştır., Model kalibre edildikten sonra hassasiyet analizleri yapılmıştır.

Toplanan veriler (jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik, hidrojeokimyasal vb.,) yardımıyla sayısal modele çevrilen bu çatışma ile mevcut yeraltı suyu iş eti m koşul I arı n n akifer üzerindeki etkisi araştırılmıştır..

Çalışma Alanının Yeri ve Özellikleri

Afyon. Ovası, 38° - 39° kuzey enlemleri ile 30° - 31° doğu boylamları, arasında yer almaktadır. Ova, yaklaşık olarak 230 km²'lik bir alan kaplamakta olup, 818.5 kırırlık bir yüzey drenaj alanına sahiptir (Şekil 1).. Ova kötü hemen hemen tüm ova boyunca 1010-1020 inlerde bulunmaktadır. Ovayı çevreleyen yükseltiler ise 1400-1700 m'ye kadar ulaşmaktadır. Bölgede karasal iklim hüküm sürmektedir, Afyon Devlet Meteoroloji İstasyonundan elde edilen verilere göre yıllık ortalama yağış miktarı 417.7 mm, buharlaşma miktarı ise 1170 mm'dir. İnceleme alan içerisinde yer alan en önemli akarsu, ovayı yaklaşık olarak KB-GD yönlü kateden Akarçay'dır.



Şekil 1. Afyon Ovası yer buldum haritası
Figure 1. Location map of Afyon Plain

Afyon Ovası ve yakın civarının jeolojik yapısı Metin vd. (1987), Erkan vd. (1996), Metin vd. (1988), Aydar vd. (1996) ve Tezcan vd., (2002) tarafından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Alanda en yaşlı birimi Paleozoyik yaşlı Iscehisar Mermerleri (Pz-Mrm) ve Metakonglomera Üyesi'nden (Pz-Mkg) oluşan Afyon Metamorfileri (Pz-Sst) oluşturmaktadır. İnceleme alanında geniş alanlar kaplayan Senozoyik yaşlı birimler Miyosen (Mi-Dtr), Pliyosen (Pl-Dtr) ve Kuvaterner (Q-Alu) ile temsil edilmektedir.. Pliyosen yaşlı birimler Mam Üyesi (Pl-Mrn), Kireçtaşı Üyesi (Pl-Kct), Şeydiler Tüf ve Aglomeralan (Pl-Tuf), Trakit (Pl-Tra) ve Bazalt (Pl-Baz)'tan oluşmaktadır. Senozoyik yaşlı birimler Paleozoyik yaşlı kayalar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir.

İnceleme alanım da içine alan bölge hidrojeolojisi Tezcan vd. (2002) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Afyon Ova-

sı'nda yeraltısuyu Neojen yaşlı kayaların kumlu ve çakıllı seviyelerinde bulunmaktadır. Bu seviyeler yüksek iletkenlik ve depolama özelliğine sahiptirler. Neojen yaşlı volkanik kayalar da çatlak ve eklem sistemleri boyunca yeraltısuyu taşımaktadırlar.. Bu kayalar, geçirimsizliği çok düşük ($K < 0.01$ m/gün) ve genel olarak yüzeyden itibaren 10-20 m derinliğe ulaşan Kuvaterner yaşlı alüvyon ile örtülmüştür. Bu örtüde yer alan Kuvaterner killeri ile Neojen'in maralı seviyeleri ova alanında akiferlerin basınçlı bir özellik kazanmasına neden olmaktadır. Ovada, Neojen'in altında yer alan Paleozoyik yaşlı kayalar ise sıcak su akiferini oluşturmaktadır.

Su Bütçesi

Afyon Ovası için su bütçesi Tezcan,, vd. (2002) tarafından Akarçay Havzası için ya-

pılan su bütçesi çalışmaları kapsamında bir yüzey su bütçesi modeli olan "abcd" modeli (Thomas, 1981) ile hesaplanmıştır "abcd" modelinin uygulanması sırasında havzada bulunan akım gözlem, istasyonlarının drenaj alanları esas alınmış ve her akım. gözlem istasyonunun gerisinde kalan alanın model parametreleri akım değerleri ile kalibre edilmiştir. Her hücre için "abcd" modeli ile üretilen yüzeysel akış değerleri toplanarak akım gözlem istasyonunun bulunduğu noktadaki toplam akım değeri belirlenmiş ve istasyonda gözlenen değerlerle karşılaştırılmıştır. Gözlenen akış değerleri ile hesaplanan değerler arasındaki farkı minimize edecek şekilde model parametreleri (a,b, c, d) her bir hücre için evrik olarak hesaplanmıştır.

Çizelge L Afyon Ovası su bütçesi

Table L Water budget for Afyon Plain

	Beslenme ($m^3/yıl$)	Boşalım ($m^3/yıl$)	
Sincanlı ve İhsaniye Ovala-	2.5×10^6	10×10^6	
			Sınır
Neojen ve Paleozoyik.	12.5×10^6	Kuyular	4.5×10^6
		Diğer	0.5×10^6
Toplam	15×10^6	Toplam	15×10^6

Bu model aracılığı ile 1965-1998 yılları arasında hesaplanan beslenme değeri Afyon Ovası için ortalama $15 \times 10^6 m^3/yıl$ olarak belirlenmiştir (Çizelge 1).. Bu değer $2.5 \times 10^6 m^3/yıl$ içe akış ile Sincanlı ve

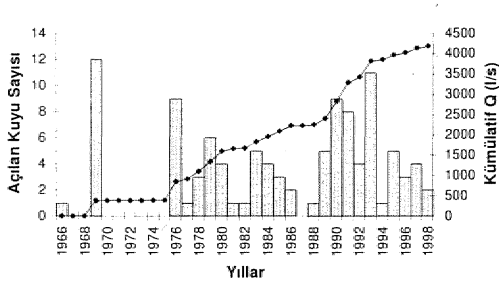
İhsaniye Ovaları'ndan gelmektedir. Geri kalan kısmı ise ağırlıklı olarak ovayı çevreleyen volkanik kayalardan, Neojen ve Paleozoyik kayalardan gelmektedir;. Ova yüzeyinden herhangi bir beslenme olmadığı varsayılmıştır. Afyon Ovası'nda yılda ortalama $10 \times 10^6 m^3$ hacminde yeraltı suyunun ovanın güney sınırından dışarıya akış yoluyla ovayı terk ettiği belirlenmiştir.

Ovada açılmış sulama kuyularından yapılan çekim değerlerinin kaydı bulunmamaktadır. 1993 yılı sonu itibarıyla ovada açılmış kuyuların toplam çekim kapasiteleri $4000 l/s$ 'nin üzerine çıkmıştır. Ancak ovada bulunan sulama, kooperatiflerinin kuyu çekimleri için harcadığı elektrik tüketimlerinden yola çıkılarak yapılan hesaplamada bu kuyuların yılda 500 saat çalıştıkları belirlenmiştir (Tezcan vd., 2002). Yıllara göre çekim debileri ele alınarak yapılan değerlendirmede 1966 yılından itibaren açılan sulama kuyuları ile ortalama $4.5 \times 10^6 m^3/yıl$ çekim yapıldığı hesaplanmıştır. Ova için hesaplanan beslenme ve boşalım değerleri arasındaki $0.5 \times 10^6 m^3/yıl$ farkın, ovada ruhsatsız kuyularla yapılan çekimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kuyularla çekimi.

Ovada, daha çok sulama amaçlı olmak üzere 1966-1998 yılları arasında soğuk su akiferi içinde Devlet Su İşleri tarafından açılmış olan 105 adet sondaj kuyusu yer almaktadır. Bu kuyulara ait genel özellikler Atilla (2002) tarafından özetlenmiştir. Kuyu debileri $6-75 l/s$ arasında değişmekte-

dir. Bu kuyuların hepsi Neojen çökelleri içinde açılmıştır. Kuyularla, çekim, Mayıs ayından başlayarak Ekim ayına kadar devam etmektedir. Ovada açılan kuyu sayılarının yıllara göre dağılımları ve çekim miktarları Şekil 2'de verilmiştir. Bu şekilden çekim, miktarının açılan kuyu sayısına bağlı olarak 1976 yılından sonra artış gösterdiği ve özellikle 1990 yılından sonra da ovada önemli ölçüde yeraltı suyu kullanımının gerçekleştiği görülmektedir.



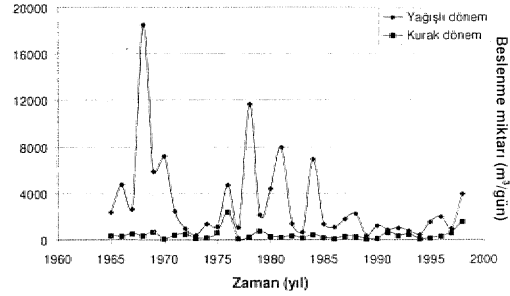
Şekil 2.. Kuyu sayılarının yıllara göçe dağılımları ve çekim miktarları

Figure 2. Annual distribution of the number of the wells and discharge rates

Beslenme

Model alanında yeraltı suyu beslenimini sağlayan en önemli birim Pliyosen yaşlı volkanik kayalardır. Bunun yanı sıra,, Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden, de fay yüzeyleri aracılığı ile bir beslenme gerçekleşmektedir. Tezcan vd. (2002) tarafından Akarçay Havzası için oluşturulan hidrolojik model sonucu elde edilen beslenme değerleri Afyon Ovası için ayrılanarak modele aktarılmıştır. 1965-1998 yılları arasında ova akiferine olan beslenme miktarları Şekil 3'de verilmektedir. Ovanın üst kıs-

mında yer- alan alüvyon örtünün geçirimsiz olması nedeni ile ova yüzeyinden ve Akarçay nehrinden bir beslenme meydana gelmemektedir. Buharlaşma kaybı da aynı nedenle göz önüne alınmamıştır.



Şekil 3. Afyon Ovası yeraltı suyu besleniminin yıllara göre değişimi

Figure 3. Annual variation of groundwater recharge rates

Yeraltı suyu Akım Modeli

Bu çalışmada yeraltı suyu akım denklemini çözmek için, USGS (United States Geological Survey) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı olan modüler sonlu-farklar akım modeli MODFLOW-2000 kullanılmıştır., MODFLOW, dünyada çok geniş kullanım alanına sahip bir yeraltı suyu akımı benzeşim programı olup,, yeraltı suyu akımı kısmi diferansiyel eşitliğini hidrolik yük için çözmektedir (McDonald and Harbaugh, 1988):

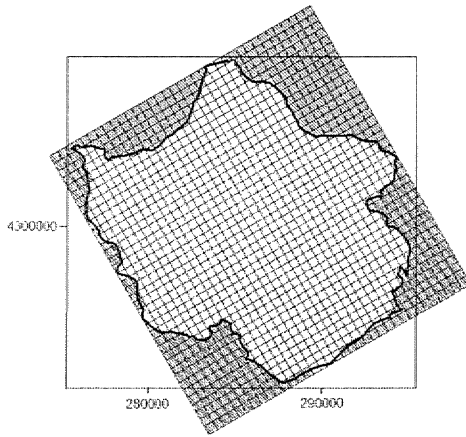
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Burada, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = Hidrolik iletkenlik katsayısının x, y, z koordinat eksenlerin-

deki bileşenleri ($L T^{-1}$), h = Hidrolik yük (L), W = Hacimsel su katkısı/kaybı (T^{-1}), S_s = Özgül depolama (L^{-1}), t = Zaman (T)'dir.

Grid tasarımı ve model katmanları

Sonlu farklar gridlerinin yaratılması, sınır koşulları ve başlangıç koşullarının tanımlanması ve uygulanması, grid ağları için gerekli parametrelerin tanımlanması ve MODFLOW'a bu bilgilerin taşınması için Argus Interware, Inc. (1997) tarafından geliştirilen Argus-ONE (Argus-Open Numerical Environments) coğrafi bilgi sistemi programından faydalanılmıştır. Bu program kullanılarak,, yaklaşık olarak 230 km²'lik bir alan kaplayan Afyon Ovası 357 kolon, 381 satır ve toplam 136017 adet bloktan oluşan sonlu farklar gridlerine bölünmüştür. Grid eksenleri, Afyon Ovası'nda yeraltısuyu akım yönü ile çakıştırılacak şekilde seçilmiştir (Şekil 4).. Her bir hücre 50 m x 50 m'lik bir alan temsil etmektedir.,



Şekil 4. Afyon Ovası için oluşturulan sonlu farklar gridleri

Figure 4, Finite difference grids for Afyon Plain

Model katman sayısı ne kadar fazla olursa hesaplamalar o kadar hassas olmakta, ancak sayının fazla tutulması model çalışma süresini artırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada en fazla 7 model katmanı oluşturulabilmiştir. Kuyularla çekimin yoğun olduğu ilk 6 model katmanı kalınlığı 50 m, 7. katmanın kalınlığı 100 m olarak alınmıştır. Kuyu çekimleri, ovada açılmış tüm kuyuların filtrelendiği derinliklere uygun olarak ilgili model katmanlarından yapılmıştır (Atilla, 2002). Afyon Ovası üstten geçirimsiz bir örtü ile kaplı olduğundan tüm model katmanları basınçlı akifer olarak değerlendirilmiştir.

Hidrolik parametrelerin dağılımı

Afyon Ovası akiferinin hidrolik parametreleri (K , S) ovada açılmış kuyu logları ile sabit debili pompalama denemesi sonuçlarının Tezcan vd. (2002) tarafından değerlendirilmesi ile elde edilmiştir, Model alanına ait parametreler adı geçen çalışmadan değiştirilmeden aynen alınmıştır. Tüm model katmanları için farklı hidrolik iletkenlik katsayısı (K) değerleri kullanılmıştır. Hidrolik iletkenlik katsayısı parametrelerinin ova soğuk su akiferindeki dağılımları 0.1-18 m/gün arasında değişmektedir. İnceleme alanında düşey yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısı mfr-dönük hiçbir veri bulunmamaktadır. Anderson and Woessner (1991) ve Spitz and Moreno (1996) yaptıkları literatür taramasında düşey yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısının yatay yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısına oranının 1/1 - 1/10 arasında değiştiğini,, ancak bazı model çalışmalarında bu oranın 1/1000'e kadar çıktığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada bu oran kalibrasyon sırasında belirlenerek,, 1/5 olarak alınmıştır (Atilla, 2002).

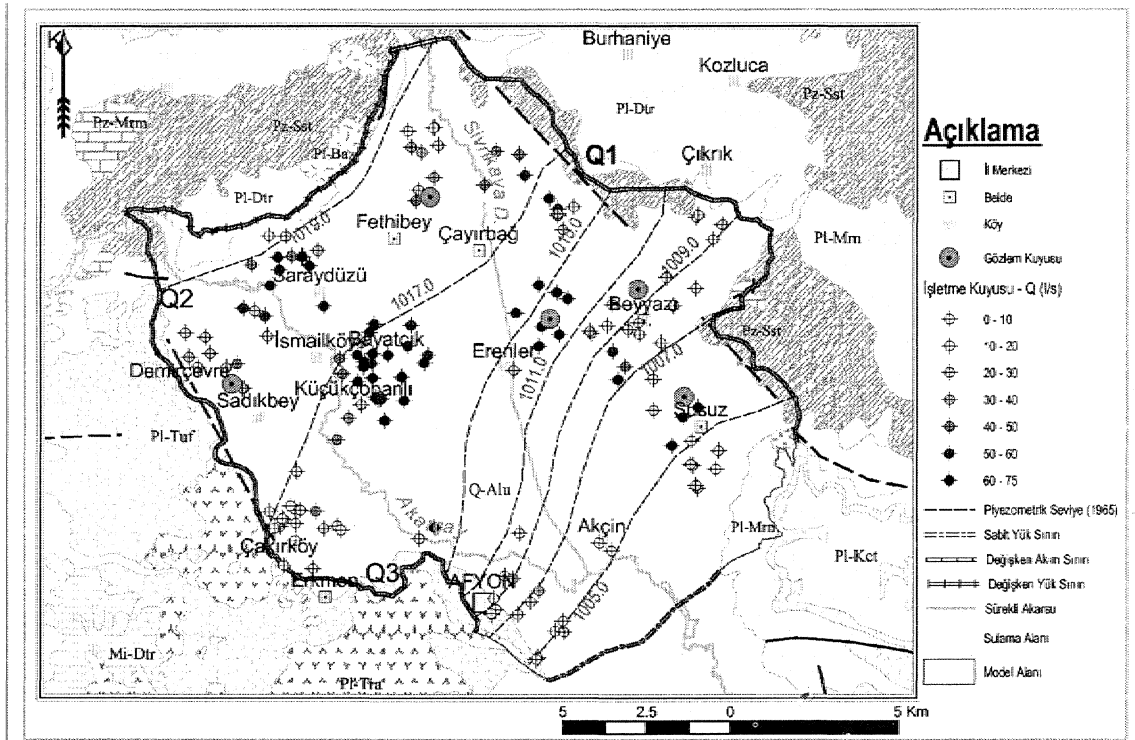
Depolama katsayısı değerleri (S) ise ova genelinde 0.005-0.06 arasında değişmektedir. Bu değerler ova ortasında 0.03-0.06, ova KB-GD hattında ise 0.015-0.03 arasında değerler almaktadır. Depolama katsayısının düşey yöndeki değişimini gösterir herhangi deneysel bir veri olmadığı için depolama katsayısının düşey yöndeki dağılımı dikkate alınmamıştır.

Başlangıç koşullan ve model süresi

Ovada yeraltısuyu işletmeciliği 1966 yılından itibaren başlamıştır.. Bu, nedenle 1966 yılının öncesinde ovadaki yeraltısuyu seviyesinin tahmin edilmesi amacı ile model,

çekim olmaksızın dengeli akım koşullarında çalıştırılmış ve akifer hidrolik özellikleri, beslenme koşulları ve sınır koşullarına bağlı olarak dengeli yeraltısuyu seviyesi dağılımı elde edilmiştir (Şekil 5).

Model süresi yeraltısuyu işletmeciliğinin, başladığı 1966 yılından 1 yıl öncesinde (1.965) başlatılmış, seviye ve kalite gözlemlerinin yapıldığı 1998 yılına kadar sürdürülmüştür. Modelde zaman birimi gün olarak seçilmiştir. Her yıl içerisinde yağışlı ve kurak dönemler altışar aylık (180 gün) stres periyotları olarak belirlenmiştir., Her stres periyodu içerisinde toplamı koyu çekimleri ve beslenme değerleri her gün için eşit olarak modele aktarılmıştır.



Şekil 5. Başlangıç hidrolik yük dağılımı ve sınır koşulları (Atilla, 2002'den)

Figure 5. Initial hydraulic head distribution and boundary conditions (after, Atilla, 2002)

Sınır koşulları

Atila (2002) yaptığı çalışmada Afyon Ovası'nda beslenmenin, model sınırlarından içe akış yolu ile meydana geldiğini belirtmiştir. En önemli beslenme alanını ovanın B, GB kesiminde yer alan ve yüksek bir topografyaya sahip olan Pliyosen yaşlı volkanik kayalar oluşturmaktadır. Bu kesimden olan beslenme mevsimlere göre değişiklik gösterdiği için "değişken akım sınırı" olarak modele aktarılmıştır (Bkz. Şekil 5). Bu sınırdan olan beslenme, tüm model katmanlarına, sınır boyunca açılmış bir dizi kuyu ile her stres periyodu için ayrı değerler olarak verilmiştir.

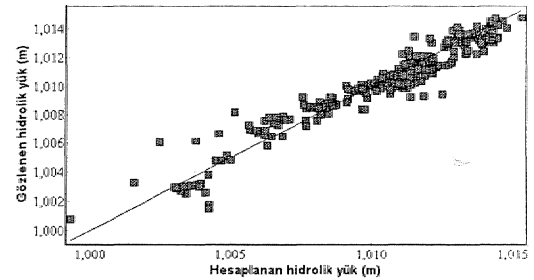
Ovanın K ve KD sınırında geniş yüzey alanına sahip Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden süzülen sular da fay yüzeyleri aracılığı ile "değişken akım sınırı" koşulu ile benzeştirilmiştir (Bkz. Şekil 5). Ovanın kuzey sınırında İhsaniye Ovası'ndan, KB sınırında ise Sincanlı Ovası'ndan iç akışla meydana gelen yeraltısuyu besleniminin, bu ovalar ile model alan arasındaki hidrolik gradyana bağlı olarak değişeceği göz önüne alınarak her stres periyodu için "değişken yük sınırı" olarak benzeştirilmiştir. Model benzeşiminin başladığı 1965 yılı ile 1998 yılları arasında bu yükün sabit kalmadığı düşünülmektedir 65 yılından 98 yılına kadar ovanın KD'sunda sabit hidrolik yükün 1020 m'den KB'sında ise 1019 m'den 1015 m'ye düştüğü gözlem kuyularındaki seviye değişiminden belirlenmiş ve her stres periyodu için ayrı değerler girilmiştir.

Ovanın G, GD sınırında meydana gelen havza dışına akış da "sabit yük sınırı" ile benzeştirilmiştir (Bkz. Şekil 5). Buradaki yük değeri ova dışında kalan Salar belesindeki kuyularda ölçülen değerler dikkate

alınarak 1002 m olarak verilmiştir. Ovanın GD'sunda yer alan Pliyosendin marnlı ve killi kireçtaşı seviyelerinden ise bir beslenme gerçekleşmediği varsayılmıştır.

Model kalibrasyonu

Bu çalışmada kalibrasyon için akifer hidrolik iletkenlik katsayıları evrik modellerne tekniğini kullanan "MODFLOW" programı ile kalibre edilmiş ve sonuçlar Afyon Ovası'nda yer alan 5 adet gözlem kuyusunda ölçülen hidrolik yük değerleri ile karşılaştırılmıştır. Gözlem kuyuları, ovanın B'sında yer alan Sadıkbey, K'inde yer alan Fethibey, D'sonda yer alan Kumartaş (Erenler) ve Beyyazı ile GD'sında yer alan Susuz köylerinde bulunmaktadır (Bkz. Şekil 5). Hesaplanan ve gözlenen hidrolik yükler arasındaki ilişkiyi görmek amacı ile 50 m x 50 m'lik grid aralıkları için elde edilen kalibrasyon grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri arasında iyi bir uyum gözlenmektedir.

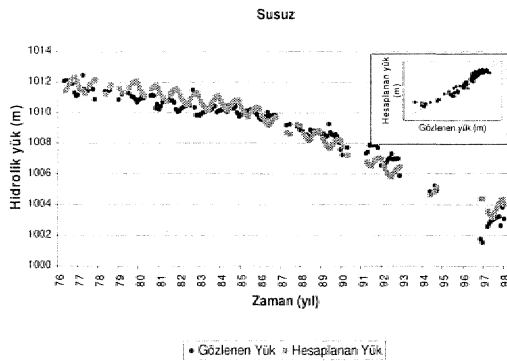


Şekil 6. 50x50 m'lik grid aralıkları için elde edilen kalibrasyon grafiği

Figure 6. Calibration graph obtained for 50 x 50 m grid interval

Grafiklerin dikey ekseninde yer alan "gözlenen hidrolik yük" değerleri, ovada, yer

alan 5 adet gözlem kuyusundan elde edilen değerlerin tümüdür.. Gözlenen hidrolik yük değerleri ile kalibrasyon sonucu hesaplanan hidrolik yük değerlerinin karşılaştırılması amacıyla ile her bir kuyu için elde edilen değerler Atilla (2002) tarafından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada gözlem sayısı fazla olan Susuz kuyusu için elde edilen grafik Şekil 7'de sunulmuştur.. Bu grafikten de görüldüğü üzere,, gözlenen hidrolik yük değerleri ve hesaplanan değerler arasında iyi bir uyum gözlenmektedir. Şekil 7' de gözlenen ve hesaplanan hidrolik yük dağılımlarının zamana göre değişimi ile gözlenen hidrolik yük değerleri ve hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki ilişki de görülmektedir.. Grafikten elde edilen sonuçlara göre,, yeraltı suyu kullanımına bağlı olarak hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri birbirine uyumlu olarak zamanla azalmaktadır. Susuz kuyusunda gözlenen ve hesaplanan değerler arasındaki maksimum fark 2.8 m'dir Bu değerlendirme göz önüne alındığında, gözlenen ve hesaplanan değerlere bağlı olarak model kalibrasyonu iyi bir sonuç vermiştir.

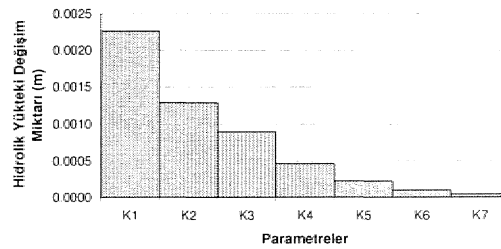


Şekil 7. Susuz kuyusunda model kalibrasyonu sonucunda gözlenen ve hesaplanan hidrolik yükler (m) arasındaki ilişkiler

Figure 7. The relation between observed and calculated hydraulic heads in Susuz well (m)

Hassasiyet analizi

Bu çalışmada yapılan hassasiyet analizinde, hassasiyet katsayısı,, model parametrelerinde yapılacak bir değişikliğin hidrolik yük değerinde oluşturacağı değişimi temsil etmektedir.. Afyon Ovası yeraltı suyu akım modeli kalibrasyonu yapıldıktan sonra sınırlardan olan beslenme değerleri {Q1, Q2, Q3 (Bkz. Şekil 5)} ile her bir model katmanındaki hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7) kullanılarak MODFLOW-2000 model programı altında hassasiyet analizi yapılmıştır. Yapılan bu analiz sonucu hesaplanan maksimum hassasiyet katsayısı değerleri Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Hassasiyet, katsayıları.

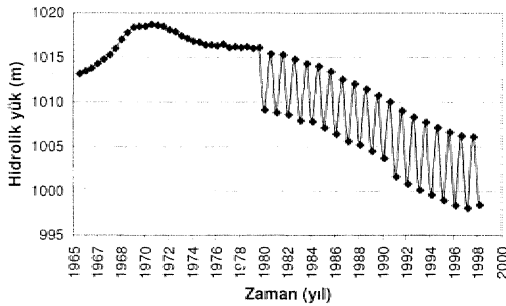
Figure 8. Sensitivity' coefficients

Şekil 8 incelendiğinde,, K5, K6, K7 parametreleri ndeki değişimin model tarafından hesaplanan hidrolik- yük değerleri üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi olmadığı, diğer bir deyişle model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerlerimin bu parametrelere göre hassas olmadığı belirlenmiştir. Aynı şekilde hidrolik yük değerleri, Q1, Q2 ve Q3 parametrelerine göre hiç hassasiyet, göstermediğinden grafikte yer almamaktadır. Model

sonuçlarının K1, K2, K3 ve K4 parametrelerine göre çok küçük bir oranda hassasiyet göstermesi ise bu parametrelerin bulunduğu model katmanlarında kuyularla yoğun bir çekimin olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu hassasiyetin derecesi sonuçlarda çok önemli bir etkiye sahip olmayacaktır.

Benzeşim, sonuçları

Afyon Ovası yeraltısuyu akım modelinde kalibrasyon analizi yapıldıktan sonra elde edilen hidrolik yük dağılımına bağlı olarak kuyularla çekimin yoğun olduğu ve civarın orta-doğu kesiminde yer alan Kumataş (Erenler) çevresi için çizilen hidrolik yük-zaman grafiği Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'dan da görüldüğü gibi yaklaşık olarak 1978 yılından sonra Kumataş çevresinde kuyularla çekimin artmasına bağlı olarak zamanla hidrolik yük değerleri azalmaya başlamıştır. Bu yıldan sonra grafikte görülen dalgalanma Kumataş ve çevresinde kuyuların çalıştığı ve çalışmadığı dönemlerde meydana gelen hidrolik yük değerlerindeki değişimi göstermektedir..

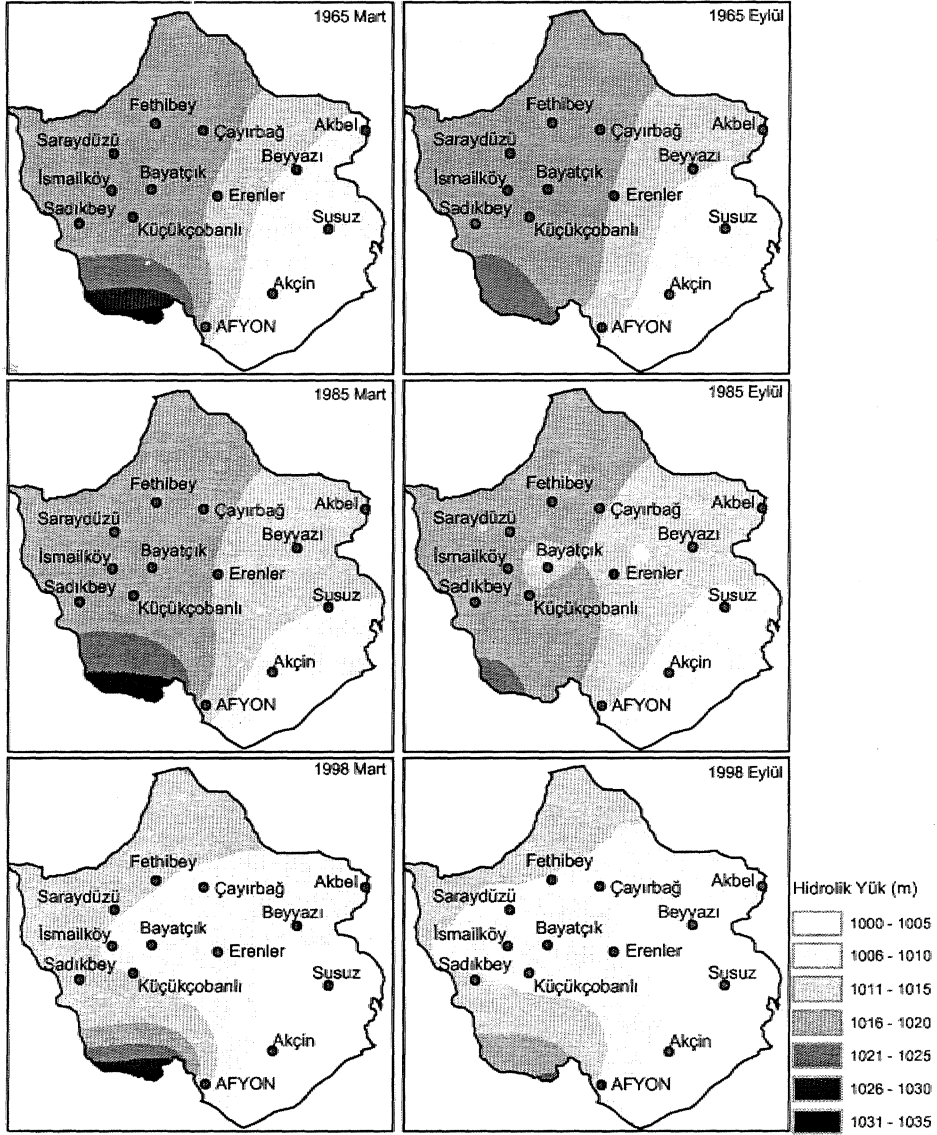


Şekil 9. Kumataş çevresinde hesaplanan hidrolik yük değerleri

Figure 9.. Calculated hydraulic head values of Kumartaş region

Hidrolik yük değerlerinde çekime ve zamana bağlı olarak meydana gelen değişim dikkate alınarak ova geneli için değişik zaman adımlarında model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri Şekil 10'da verilmektedir. Bu değerler 1965, 1985 ve 1998 yılları Mart ve Eylül ayı sonları için model tarafından hesaplanan değerlerdir..

Kuyularla çekimin sona erdiği sulama mevsimi sonları için (Eylül ayı sonu) çizilen grafikler incelendiğinde; ova genelinde hidrolik yük dağılımının zamana bağlı olarak ovanın KB kısmından GD kısmına doğru azaldığı görülmektedir. 1965 yılı sulama mevsimi sonunda ovanın K ve orta bölgelelerinde model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri 1020-1015 m arasında değişmekte iken bu değerler ovanın orta ve D kısmında yer alan Erenler (Kumataş), Bey yazı ve Akbel çevresinde 1015-1010 m arasına,, Susuz ve Akçin çevrelerinde 1010-1005 m arasına ve ova G'inde ise 1000 m'lere düşmektedir., 1985 yılı Eylül ayı sonunda, kuyularla yapılan yoğun çekime bağlı olarak özellikle ova ortasında yer alan Bayatçık ve Erenler çevresinde bir düşüm olduğu gözlenmektedir. 1998 yılı Eylül ayı sonunda, ise artan kuyu sayısı ve çekime bağlı olarak ova geneli için hidrolik yük değerlerinin Beyyazı, Susuz ve Akçin çevrelerinde 1005-1000 m, ovanın orta kesimlerinde 1010-1005 m, B'sında ise 1020-1015 m'ler arasında değiştiği gözlenmektedir..



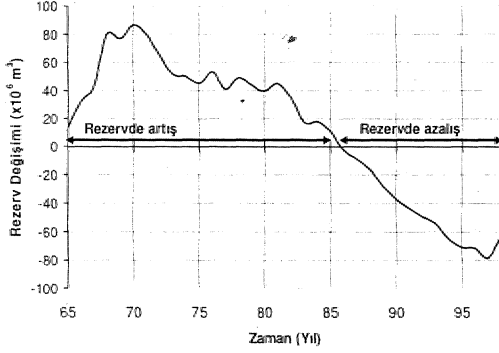
Şekil. 10. Model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri (1965, 1985, 1998 yılları için)

Figure 10. Calculated hydraulic head values for the years 1965, 1985, 1998

İnceleme alanının B, GB'sında yüzeylenen Pliyosen yaşlı volkanik kayalar en önemli beslenme alanını oluşturmaktadırlar.. Bu sınırdan olan beslenme etkisi grafiklerde belirgin bir şekilde gözlenmekte ve

zamana bağlı olarak değişmektedir. Afyon Ovası yeraltısuyu akım modeli sonuçlarına göre 1965-1998 yılları arasında ovada yeraltı suyu rezervindeki değişim incelenmiş ('Şekil 11) ve ovada yeraltı suyu rezervindeki

azalma. 1998 yılı sonu için 80 milyon m³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. Afyon Ovası yeraltı suyu rezervinin zamana bağılı değışimi (1965-1998)

Figure 11« Temporal variation of groundwater reserve in the Afyon Plain (1965-1993)

Sonuçlar ve Tartışmalar

Yeraltı suyu kullanımının artan yoğunlukta gerçekleştiği Afyon Ovası'nda soğuk yeraltı suyu sisteminde meydana gelecek etkilerin öngörülmesi amacı ile ovadaki yeraltı suyu akımının MODFLOW matematiksel modeli ile zamana ve konuma bağılı gelişimi belirlenmiştir.

Model sınır koşulları için ovanın B, GB kesiminde yer alan ve yüksek bir topografyaya sahip olan Pliyosen yaşlı volkanik kayalardan olan beslenme değerleri ile ovanın K ve KD sınırında geniş yüzey alanına sahip Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden süzülen sular aracılığı ile olan beslenme değerleri mevsimlere bağılı olarak değışiklik gösterdiğinden "değışken akım sınırı" olarak modele aktarılmıştır.

Ovanın kuzey sınırından iç akışla meydana gelen, yeraltı suyu beslenimi "değışken yük sınırı", ovanın G, GD sınırında meydana gelen boşalım "sabit yük sınırı" olarak verilmiştir. Ovanın GD'sunda yer alan Pliyosenin marnlı ve killi kireçtaşı seviyelerinden ve ova yüzeyini oluşturan alüvyon malzemenin ise bir beslenme gerçekleşmemektedir. Başlangıç koşulları için, yeraltı suyu işletmeciliğinin öncesindeki su seviyelerinin tahmin edilmesi amacı ile model, çekim olmaksızın dengeli akım koşullarında çalıştırılmıştır. Kuyu çekimleri, ovada açılmış tüm kuyuların filtrelendiği derinliklere uygun olarak ilgili model katmanlarından yapılmıştır. Model zaman birimi gün olarak seçilmiştir. 1965-1998 yılları içerisinde yağışlı ve kurak dönemler altışar aylık (180 gün) stres periyodları olarak belirlenmiştir. Her stres periyodu içerisinde toplam kuyu çekimleri ve beslenme değerleri her gün için eşit olarak modele aktarılmıştır.

Bu çalışmada akım süreçlerinin kalibrasyonunda hidrolik iletkenlik katsayıları evrik olarak kalibre edilmiştir. Ova alanının değışik kesimlerinde yer alan gözlem kuyularında gözlenen yük değerleri ile hesaplanan, değerler arasında oldukça iyi bir uyum yakalanmıştır. Kalibrasyonun kalitesini kontrol eden bir diğer kriter ise parametre hassasiyetidir. Modelin parametrelere karşı çok duyarlı olmaması gerekir. Afyon Ovası'nda çekimin en yoğun olduğu model katmanında hidrolik iletkenlik katsayısına olan hassasiyet literatür ve standartlarda (ASTM, 1999) verilen değerlere göre çok küçük çıkmıştır. Bu durum, akım modelinin

sistem hakkındaki gözlem ve ölçülmüş verilere başarılı bir uyum sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte,, bu alana ait kavramsal modelin farklı bir tasarımının da başarılı bir kalibrasyon sağlayabileceği unutulmamalıdır.

Ova geneli için değişik yıllara ait model tarafından hesaplanan hidrolik yük değişimi grafikleri çizilmiş ve hidrolik yük değerlerinin zamanla kuyularla çekimin artmasına bağlı olarak 1998 yılı sonunda ova K'inde 1010 m'lère, ova C'inde özellikle çekimin yoğun olduğu bölgelerde ise 1000 m'lère düştüğü belirlenmiştir. Ovada yeraltı suyu rezervindeki azalma 1998 yılı sonu için 80 milyon m³ olarak hesaplanmıştır.

Bu model çalışmasının sonuçları, gelecekte soğuk su akiferinden daha fazla yeraltı suyu çekilmesi halinde, termal yeraltı suyu sisteminden kaynaklanan kalite bozulmalarının çok daha fazla olabileceğini göstermektedir. Ancak bu durum, sıcak su kullanımının ve beslenme şartlarının bugünkü düzeyinde olması halinde mümkün olabilir. Günümüzdeki durum göz önüne alındığında,, kalite bozulmaları ve piyezometrik seviyedeki düşümlerin önlenmesi için tatlı yeraltı suyu kullanımının doğal hidrolik denge koşullarını bozmayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir;. Ova soğuk su akiferinin günümüzdeki durumunun belirlendiği bu çalışma,, bölgede gelecekte planlanan yeraltı suyu işletim projelerinin, akifer üzerinde yaratacağı etkilerin belirlenmesine bir temel oluşturacaktır.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi - Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) ile Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, arasında yürütülen. "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltı suyu Akım Modeli." Projesine paralel olarak yürütülmüştür. Yazar, adı geçen kurum, ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür eder.

Değinen. Belgeler

- Anderson, M., Woessner, W.W., 1991. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., Sao Diego, 381 p.,
- Argus Interware, Inc., 1997. User's Guide Argus ONE™, Argus Open Numerical Environments - A GIS Modeling System,, Version. 4.0. Jerico, NY, Argus Holdings, Limited, 506 p.,
- ASTM, 1999. ASTM Standards on Determining Subsurface Hydraulic Properties and Ground Water Modeling, ASTM 0-18 on Soil and Rock (2nd Edition). ISBN 0-8031-2717-0, 320 p.
- Atilla, A. Ö., 2002,. Afyon Ovasının yeraltı suyu kütle taşıma modeli. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,, Doktora Tezi,, 78 s (yayımlanmamış).
- Aydar, E., Bayhan, H./ve Zimitoğlu, O., 1996. Afyon stratovolkanının volkanolojik. ve petrolojik gelişiminin incelenmesi,. Yerbilimleri, 18,87-107.
- Erkan, Y., Bayhan, H., Toliuoğlu, Ü. ve Aydar, E., 1996.. Afyon yöresi metamorfik ve

volkanik kayaçlarının jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelemesi., TÜBİTAK, YBAG/0044-DPT Projesi Raporu, 210 s (yayımlanmamış)..

-
- Harbaugh, A.W., and McDonald, M.G., 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model.. U.S. Geological Survey Open-File Report, 96-485, 56 p.,
- Harbaugh,, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald,, M.G., 2000.. MODFLOW-2000,, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process.. U.S. Geological Survey Open-File Report,, 00-92, i 21 p..
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W., 1988.. A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, 586 p.
- Metin, S., Genç, Ş, ve Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının, jeolojisi., MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No: 8103, Ankara (yayımlanmamış).
- Metin, S., Genç, Ş., Bulut, V., Ölmez, M., Kılıç, L, Akıncı, A., Umut, M- ve Kurt, Z., 1988.. Bolvadin (Afyon.) - Yunak (Konya) dolayının jeolojisi.. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No: 8522, Ankara (yayımlanmamış).
- Spitz, K., Moreno, J., 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport

Modeling.. John Wiley & Sons,, Inc.,, New York,, 461 p.

- Thomas,, H.A., 1981, Improved methods for National Water Assessment Report Contract No: WR15249270, US Water Resources Council.,, Washington.
- Tezcan, L., Meriç,, B,T,, Doğdu,, N., Akan, B., Atilla, A. Ö. ve Kurttaş, T., 2002. Akarçay Havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli., Final Raporu, Hacettepe Ün i versitesi - Ul uslararası Karst Su Kaynakları Uygulanıı ve Araştırma Merkezi (ÜKAM)-Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara,, 339 s (yayımlanmamış).

Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sisteminin. Modellenmesi

Modeling of the Afyon Ömer-Gecek Geothermal System

Berrin AKAN

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

ÖZ

Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanı Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarından biridir. Bölgede MTA ve özel kuruluşlar tarafından açılmış çok sayıda sıcak su kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyulardan, 48-98 °C sıcaklıkta ve 4-100 l/s debi ile sıcak su elde edilmektedir. Afyon İl Özel İdaresi tarafından oluşturulan AFJET (Afyon Jeotermal Isıtma Tesisleri) şirketi, Afyon kentinin jeotermal enerji ile ısıtılması amacıyla bölgedeki sıcak suların yararlanmaktadır. Bölgede yer alan kuyuların birbirine çok yakın olması kuyular arasında girişime ve sıcaklık düşüşlerine neden olmaktadır. Sıcak su akiferini Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfileri oluşturmaktadır. Perméabilité değeri düşük ($k=10^{-12}$ m²) olan ve kırılgan ve çatlaklı bir yapı gösteren bu birim, eklem, kırık ve çatlakları içinde sıcak yeraltısuyu bulundurmaktadır. Bu çalışma kapsamında sıcak su dolaşım sistemini ortaya koymak ve mevcut işletme koşullarının sistem üzerindeki etkisini göstermek amacı ile sıcak su akiferindeki basınç ve sıcaklık dağılımı HST3D modeli aracılığıyla benzeştirilmiştir. Model sonuçlarına göre birbirine yakın açılmış kuyular ile yapılan yoğun işletme çalışmalarının sonucu, sıcaklık ve basınç değerlerinin kuyular çevresinde zaman içerisinde giderek azaldığı görülmektedir. Akiferin hidrolik iletkenliğinin düşük olması sistemin yenilenebilmesi için uzun zaman gerektirmektedir. Bu nedenle, bundan, sonra açılacak kuyuların mevcut kuyuların uzağında,,-alanın değişik noktalarına dağılacak şekilde tasarlanması ve düşük debi ile üretim yapılması kuyular arasındaki sıcaklık etkileşimlerinin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Sözcükler: Afyon, Gecek,, HST3D, jeotermaU Ömer, sıcak su akiferi

ABSTRACT

Afyon Ömer-Gecek is one of the important geothermal areas in Turkey, with lots of boreholes drilled by MTA and other organizations, These boreholes yield 4-100 l/s hot water at 48-98 °C. AFJET' Corporation established by Afyon Private City Directory utilizes this

hot water which has been obtaining from deep boreholes for the heating of the Afyon city. The short distance between the boreholes causes interference between the wells and the temperature reduction. The hot water aquifer composed of Afyon metamorphics of Paleozoic age. The hot water, is located in the cracks of this low permeable ($k-W^2$ rmt) formation. Within the scope of this study, it is aimed to conceptualize the hot water circulation system, to indicate the effects of the current exploitation activities on the aquifer system by modeling the temperature and pressure distribution with the HST3D numerical model. According to the results derived from the model, the temperature and pressure around the boreholes decrease gradually in time. Due to the low permeability, the turnover of the system requires a long time. Therefore, new wells should be located far away from, the existing wells and exploited with low rates in order to prevent temperature interferences.

Keywords; Afyon, Gecek, geothermal area, hot water aquifer, HST3D, Ömer

Giriş .

Çalışmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında, sıcak su dolaşım sistemini açıklamak ve mevcut işletme koşullarının sistem üzerindeki etkisini göstermektir, Ömer-Gecek jeotermal alanı Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarından biridir ve bölgede MTA başta olmak üzere çeşitli kuruluşlar tarafından açılmış çok sayıda sıcak su kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyulardan, 48-98°C sıcaklıkta ve toplam 200 l/s debi ile sıcak su elde edilmektedir, Yüksek sıcaklığa sahip bu sular, bölgenin termal turizm açısından cazip bir hale gelmesine ve bu amaca hizmet eden oteller tarafından açılan kuyular ile termal akiferin kontrolsüz olarak işletilmesine neden olmaktadır, Bunun yanı sıra, Afyon İl Özel İdaresi tarafından oluşturulan AFJET (Afyon Jeotermal Isıtma Tesisleri) şirketi» Afyon kentinin jeotermal enerji ile ısıtılmasına yönelik olarak çok sayıda derin sondaj kuyusu aracılığı

ile bölgedeki, sıcak suların yararlanmaktadır, Günümüzde ısıtılan konut sayısı 4500 civarındadır, ancak jeotermal enerji ile ısıtmanın ucuz olması nedeniyle giderek artan bir talep söz konusudur, Bu talebi karşılamak amacıyla bölgede açılacak yeni kuyularla ısıtılacak konut sayısının artırılması planlanmaktadır. Ancak, Afyon kentinin ısıtılması için termal akiferin yeterli olup olmadığı konusunda bir bilgi ve çalışma bulunmamaktadır. Çok büyük yatırımlarla tüm Afyon kentinin ısıtılması için yapılan proje çalışmaları ısıtma sistemi üzerine yoğunlaşmış, jeotermal sistemle ilgili çalışmalar ise daha çok mevcut ve planlanan sondaj kuyularının tasarımı (derinlik, debi, sıcaklık, v.b.) ile ilgili olarak gerçekleştirilmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, jeotermal sistemler tükenmez bir doğal kaynak olarak görülmüş ve sistemden faydalanılırken sistemin işleyiş mekanizmasının çözülmesine yönelik çalışmalar yapılmaksızın, sıcak suyun yüzeye çıkarılarak kullanımına ilişkin faaliyetlerde bulunul-

muştur. Bu çalışma ile bu alandaki eksikliğin giderilmesi ve jeotermal sistemin işleyiş mekanizması ile şu anda geçerli olan işletme koşullarının sistem üzerindeki etkisine ışık tutulması amaçlanmıştır..

Çalışına yöntemi

Bu çalışma kapsamında, izlenen yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki jeotermal sistemi oluşturan unsurların belirlenmesi ve alanın kavramsal modelinin geliştirilmesi, ikincisi, termal akifere ait hidrolik ve termal parametrelerin belirlenmesi ve üçüncüsü de bunların matematiksel bir model yardımıyla benzeştirilmesidir. Öncelikle bu amaca yönelik olarak, inceleme alanına ait jeolojik (topoğrafik harita, jeoloji haritası, strati grafik istif, jeofizik haritaları, vb.) ve hidrojeolojik veriler derlenmiştir. Daha sonra, inceleme alanında açılan kuyulara ait kuyu loglarından yararlanılarak termal akiferin alt ve üst sınırları belirlenmiştir. MTA tarafından, inceleme alanında yer alan 13 adet kuyuda, 2000 yılının Nisan, Mayıs ve Haziran aylarında yapılan kuyu başı basıncı ölçümleri ile statik sıcaklık, dinamik sıcaklık, statik basınç, dinamik basınç, basınç toplanma, üretim ve reenjeksiyon testlerine ait veriler elde edilmiştir. Bu testlerde ölçülen, derinliğe karşılık sıcaklık ve basınç değerlerinden yararlanılarak yeraltındaki basınç ve sıcaklık profili oluşturulmuştur. Tüm bu veriler ışığında, termal akiferin yayılımı, beslenme-boşalm ilişkisi ve sınır koşulları belirlenmiş ve bu bilgiler matematiksel bir model yardımı ile değerlendirilerek Afyon Ö-

mer-Gecek jeotermal alanının hidrojeolojik modeli oluşturulmuştur. Modelleme aşamasında, Kipp (1987) tarafından geliştirilen HST3D (The Heat and Solute Transport Program) model programı kullanılmıştır. HST3D, ısı ve kütle taşınımını modelleyen üç boyutlu bir model programıdır.

Gözenekli Ortamlarda Isı Taşınımının Modellenmesi: HST3D

Jeotermal enerji üzerine yapılan araştırmaların artmasına paralel olarak gözenekli ortamlarda tek ve iki fazlı akışkan akımı ve ısı taşınımının benzeştirilmesi konusunda da büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Afyon Ömer-Gecek alanının hidrojeolojik modellenmesi yapılırken Kipp (1987) tarafından geliştirilen tek fazlı sonlu farklar modeli olan HST3D model programı kullanılmıştır. Modelde kullanılan verilerin girişi ve sonuçlarının değerlendirilmesi, bir coğrafi bilgi sistemi programı olan Argus-ONE (Argus Interware, Inc., 1997) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

HST3D model programının genel yapısı ve bu çalışma kapsamında kullanılan fonksiyon ve eşitliklerle ilgili açıklamalar Kipp (1987)'den kısaltılarak alınmıştır. HST3D bir ısı ve kütle taşınım modeli olup yeraltısuyu akımı ve bununla bağlantılı olarak ısı ve kütle taşınımını üç boyutlu olarak benzeştirmektedir. Modelde, içsel boşluk hızı, basınç, sıcaklık ve çözünmüş kütle o-

ra.n.s.na bağımlı olan akışkan yoğunluğu ve akışkan viskozitesinin birleştirilmesi ile elde edilen üç temel eşitliğin çözümü esas alınmaktadır. Eşitliklerin çözümünde sonlu farklar tekniği, kullanılmaktadır., Model .içerisinde sonlu farklar matris eşitlik çözümünde direk eliminasyon ve itératif çözüm, olmak üzere iki tür doğrusal çözüm söz konusudur., Katkı-kayıp süreçleri kuyularla ifade edilmektedir. Yüzeyle veya akiferdeki basınç koşulları ve akım. hızının benzeşti -rilmesi amacıyla karmaşık bir kuyu-akım modeli kullanılmaktadır.. Modelde kullanılan sınır koşulları, sabit değer, sabit akı, akifer ve yüzey suları sızması ve ısı iletimini kapsamakta olup tüm sınır koşulları zamanın fonksiyonudur. Veri girişi, metrik birim sistemi veya Amerikan birim, sistemine göre yapılabilmektedir.

Modelde kullanılan akışkan-kütle denge eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \left(\frac{\partial v_p}{\partial t} + \frac{\partial p_g}{\partial t} \right) + \rho \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (D)$$

Burada;

ρ akışkan basıncı (M/L/t)

t zaman (t)

n etkin porozite (boyutsuz)

ρ akışkan yoğunluğu (M/L³)

ρ^* sabit akışkan girdisine ait yoğunluk değeri (M/L³)

q akışkan girdisi akım hız yoğunluğu. (L³/L³t)

Akım eşitliği çözülürken Darcy eşitliğinden elde edilen gözenek hızı (v) kullanılmaktadır:

$$v = -\frac{1}{n} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right) \quad (2)$$

Modelde kullanılan ısı denge eşitliği şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_i p_e + (1-n) \rho_T c_p \right) r = V [n \Delta T + (1-n) K_s N T + y_n D_h V T - V n p c_f T + q_h + q p^* c_f T^*] \quad (3)$$

Burada

T ; akışkan ve gözenekli ortamın sıcaklığı (T)

T^* sabit akışkan girdisinin sıcaklığı (T)

ρ_s katı fazın yoğunluğu. (M/L³)

C_f sabit basınçtaki akışkan fazının özgül ısı (E/MT)

c_s sabit, basınçtaki katı fazın özgül ısı (E/MT)

K_f sıvı fazın termal iletkenliği (E/LtT)

K_s katı fazın termal, iletkenliği (E/LtT)

D_h termo mekanik dispersiyon tensörü (E/LtT)

q_h ısı kaynağı oransal yoğunluğu (E/L³t)

I birim matris (-)

$$E = ML^2/t^2$$

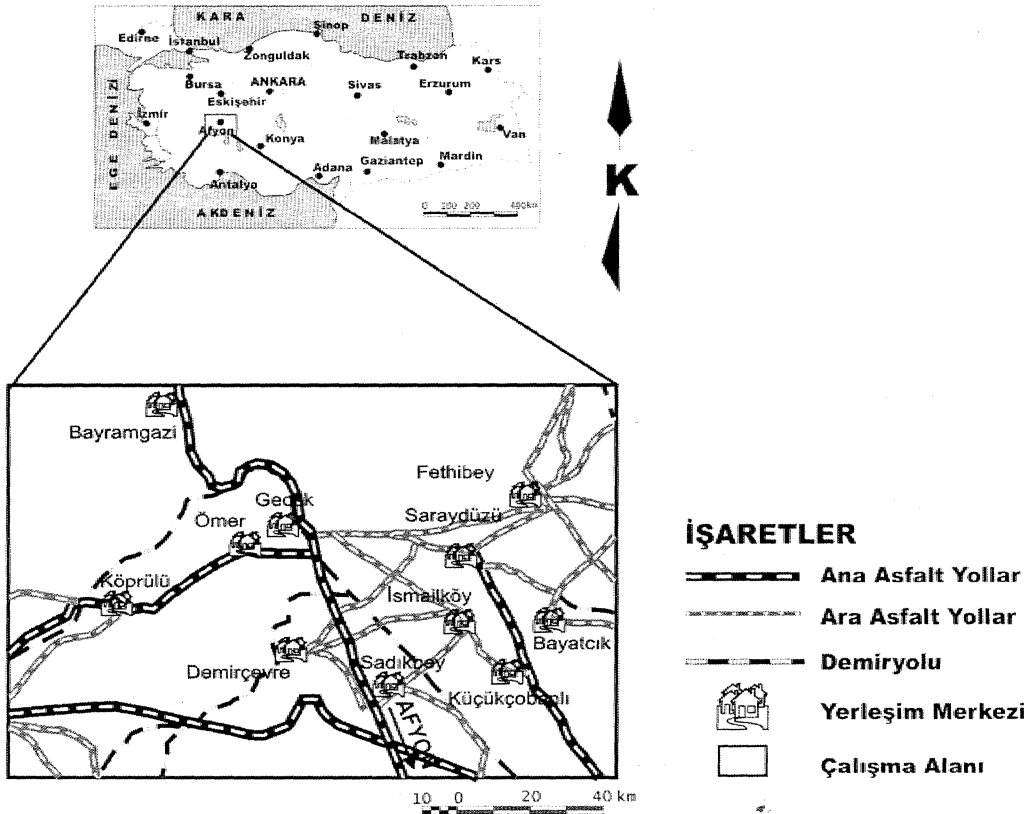
Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan akışkan ve gözenekli ortamı özellikleri ile (yoğunluk, viskozite, porozite, ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve entalpi), sıcaklık, basınç ve çözülmüş kütle oranı gibi bağımlı değiş-

kenlerin bir fonksiyonudur.. Isı ve katı dispersiyon tensörleri ise boşluk, ve içsel boşluk hızının fonksiyonudur.

İnceleme Alanının Tanıtılması ve Jeotermal Sisteme Ait Kavramsal Model İnceleme Alanının Tanıtılması

Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarından biri olan Ömer-Gecek jeotermal alanı Afyon-Kütahya karayolu üzerinde Afyon'a yaklaşık 15 km uzaklıktadır.. Yaklaşık 16

km²'lik bir alan kaplayan inceleme alanı, Afyon K24-b3 paftasında yer almaktadır.. İnceleme alanına ait yer buldum haritası Şekil T de yer almaktadır,. İnceleme alanında yer alan yerleşim merkezleri; kuzeyde Bayramgazi, batıda Köprülü, güneyde Demirçevre, Sadıkbey, doğuda Saraydüzü, Fethibey, İsmailköy, merkezde Ömer ve Gecek köyleridir, önemli yükseltiler ise; Oyuklu Tepe (1214 m), Başçakmak Tepe (1148 m) ve Çalıldüzü Tepe (1129 m)'dir.

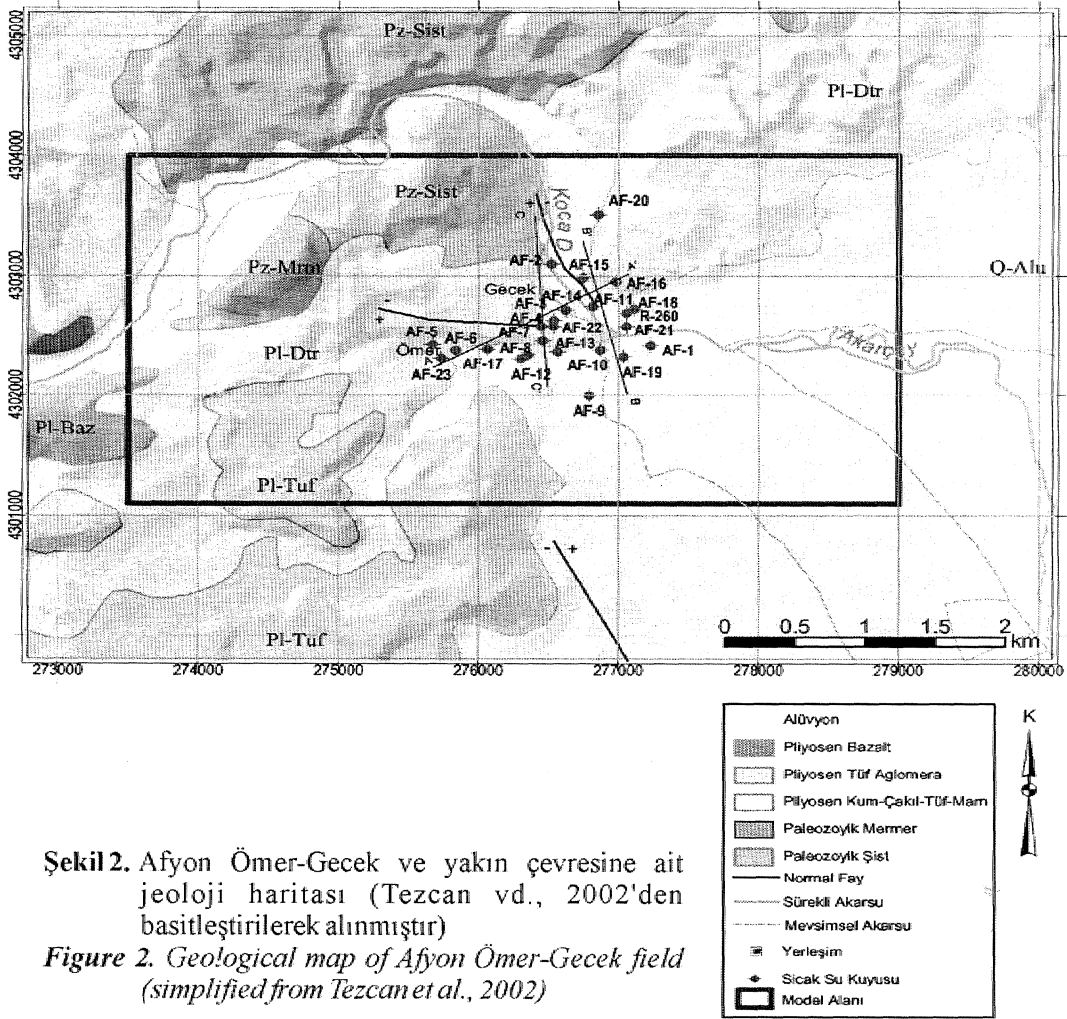


Şekil 1L İnceleme alanına ait yer buldum haritası
Figure 1. Location map of the study area

Jeoloji

İnceleme alanında. Erişen (1972), Karamandersi (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 metamorfüeri temeli oluşturmaktadır., Genellikle kahve, boz, yeşil renkli, kivnmcıkh, granoblastik dokulu, şisti yapılı ve görünüşte ileri derecede metamorfik kayca izlenimi veren bu metamorfitle, genel

olarak, albit-klorit-muskovit-biotit-kuvars şistlerden oluşmuştur. Aynea bu şistler içerisinde yer yer büyük mercek ve bantlar halinde metakonglomera, metakumtaşı, mermer ve kalkşistler yer almaktadır., İnceleme alanında geniş bir alan kaplayan Senozoyik yaş-

lı oluşuklar genel olarak Neojen yaşlı birimler ile temsil edilmekte, Neojen çökelleri inceleme alanının tamamında, Paleozoyik kayalar üzerinde uyumsuz olarak görölmektedir. Miyosen yaşlı birimler, koyu, kırmızı/kirli sarı, okside, turuncu renkli,, kalın ve kötü katmanlanmalı, konglomera-kumtaşı-silttaşı ve kiltası aralanmasından oluşmaktadır., İnceleme alanında Pliyosen, göl sel ve volkanik kakaçlar ile temsil edilmektedir. Gösel 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 birim üzerine,, silis arabandı killi kireçtaşı üyesi gelmektedir., Kireçtaşlarının üzerinde kalın tabakalanmalı, 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 örtölmüştür., Pliyosen yaşlı birimlerin kalınlığı genel olarak değişken olup; 25-350 m arasında değişmektedir. 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

Jeotermal bir sistemin elemanları; sıcak su akiferi., bon un üzerinde yer alan geçirimsiz bir örtü kayaç, ısı kaynağı ve beslenme bölgesinden oluşmaktadır, Afyon Ömer-Gecek bölgesinde sıcak suların akifer kayacını Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfite-

leri'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 ulaşılamamış olmasına rağmen yaklaşık kalınlıklarının 2000 m civarında olduğu tahmin edilmektedir. Perméabilité değeri düşük olan ve oldukça kırıklı ve çatlaklı bir yapı gösteren bu birim eklem, kırık ve çatlakları içinde 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 kayacının 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 akiferi derinlere gömölümekte, buna bağlı olarak örtü kalınlığı artmakta ve basamaklı bir yapı oluşmaktadır. Soğuk yeraltısuyu için bir akifer özelliği gösteren Neojen yaşlı birimlerin, kalın bir kil-mil-marn serisiyle başlaması ve Paleozoyik birimlerin hidrolik iletkenliklerinin çok düşük olması, Neojen akiferi ile sıcak su akiferi arasında yaygın bir ilişkinin olmasını engellemektedir.

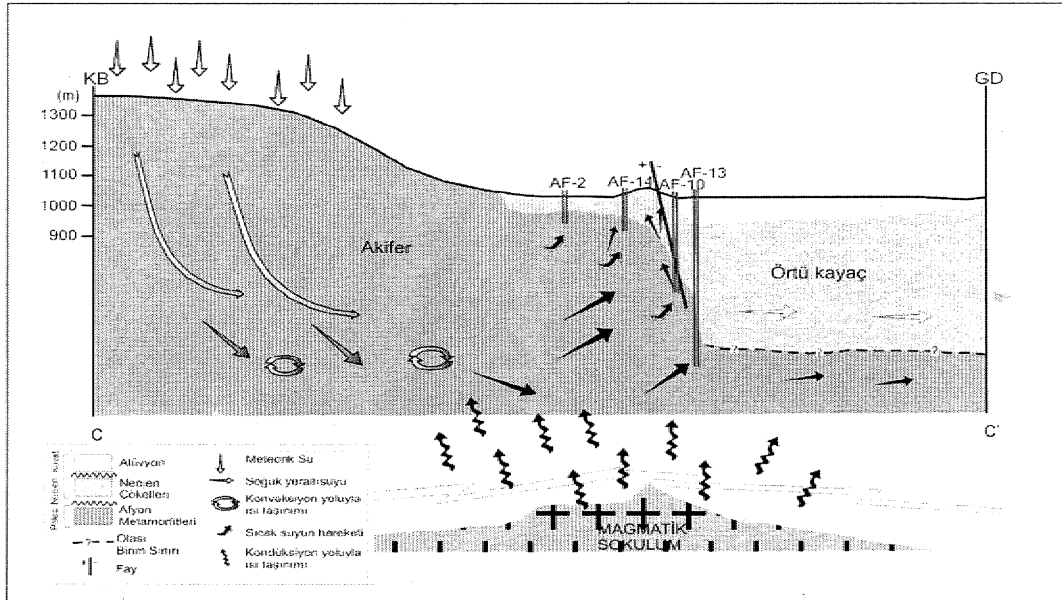
Bölgede özellikle Afyon civarında, tektonik faaliyetlere bağlı olarak Miyosen'de başlayan ve Pliyosen boyunca devam eden etkin bir volkanizmanın ürünleri geniş bir alan kaplamaktadır. Volkanik etkinliğin son

safhasını ise bazalt akıntıları meydana getirmektedir. Bu volkanik kayaçları oluşturan magma ceplerinin jeotermal sistemin ısı kaynağını oluşturduğu düşünülür. GSJ-MTA (1992), bölgede yaptıkları çalışmada bazaltlardan oluşan volkanik kayaçların 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 metamorfileri, bu birimin örtülü olduğu kısımlarda ise örtü kayacın geçirimsiz kısımları aracılığı ile dolaylı olarak ve fay hatları boyunca gerçekleşmektedir. Dolayısıyla beslenme bölgesinde yer alan Paleozoyik yaşlı metamorfilerin üzerine düşen yağış, derin bir dolaşım yolunu takip ederek, kırık ve çatlaklar boyunca derinlere süzülür ve

jeotermal gradyanın da etkisi ile bir miktar sıcaklık kazanmaktadır. GSJ-MTA (1992) bu bölgede jeotermal gradyanın yaklaşık olarak $0.6-0.8 \text{ }^\circ\text{C} / 10 \text{ m}$ olduğunu bildirmiştir.

Derinlere inen meteorik kökenli suların, magma ceplerinden kaynaklanan ısı akısının da etkisiyle sıcaklığı artmaktadır. Bu sular, sıcak ve soğuk sular arasındaki yoğunluk farkından da kaynaklanan, basınç ve bölgede yer alan faylar aracılığı ile yükselerek yüze 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 olmaları ve rezervuarda uzun bir geçiş dönemine sahip bulunmasından kaynaklandığını belirtmiştir.



Şekil 3» Afyon Ömer—Gecek jeotermal alanının kavramsal modeli

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

Termal akiferin işletilmesi

Afyon. Ömer-Gecek jeotermal alanında yer alan sıcak ve mineralli su kaynaklan,, termal turizme yönelik olarak 3 adet kaplıca ile 33 adet termal motelin ısıtılmasında ve termal olimpik bir havuza 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 kuyulardan AF-2 ve AF-12'de yeterli kalınlıkta örtü kayaç ke-

silmediğinden kuyular kontrolsüz üretim yapmış ve bu nedenle kullanım dışı bırakılmışlardır (Tamgaç vd., 2000).

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 kalmış, geri kalan kuyulardan (A.F4, AF-9, AF-11, AF-13, AF-14, AF-16, AF-17, AF-20, AF-21, AF-22, AF-23) ise kaplıca, otel ve AFJET'in sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır., Kuyulann açılışı sırasında elde edilen veriler ile 2000 yılında MTA tarafından yapılan testler sonucu elde edilen sıcaklık, kuyu başı basıncı ve debi değerleri derlenerek, Çizelge Pde sunul muştur..

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, ölçümler¹

**:.2000 yılında MTA tarafından yapılan testler sırasında alınan ölçümler

Afyon. Ömer-Gecek Jeotermal Sisteminde Sıcak Su Akiferinin Sayısal Modeli

Bo çalışma kapsamında jeotermal sistemin işleyiş mekanizması ve şti anda geçerli olan işletme koşulları ile sistemde gelecekte meydana gelebilecek değişiklikler göz önüne alınarak değişik model senaryoları türetilmiş ve sıcak su akiferinin hidrolik ve termal parametreleri göz önüne alınarak bir matematiksel model **aracılığı** ile jeotermal sistemin davranışı benzeştirilmiştir. Bu amaçla, geliştirilen jeotermal sisteme ait kavramsal modelden yola çıkılarak, sıcak su akiferine ait başlangıç ve sınır koşulları tanımlanmış ve HST3D model programı kullanılarak jeotermal sistem modellenmiştir.

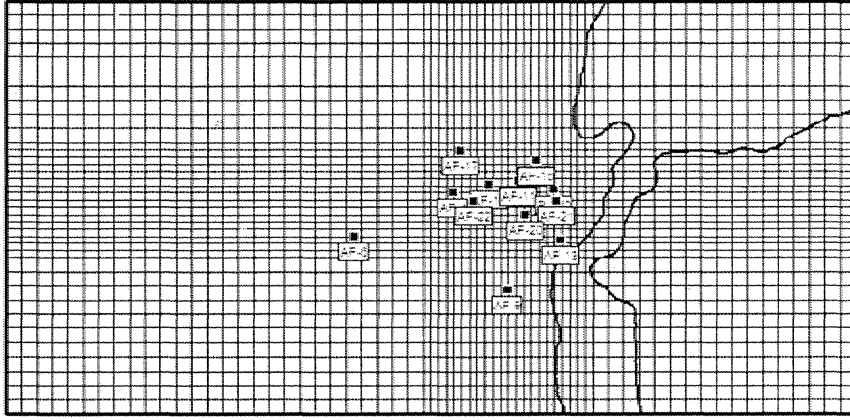
Sıcak su akiferinin termal ve hidrolik parametrelerinin konumsal değişimine ait bir bilgi bulunmadığı için akifer homojen "bir bütün olarak ele alınmıştır. İnceleme alanını temsil eden kavramsal yapı göz önüne alınarak, modelin alt sınırında ısı kaynağı ve alanın ovaya yakın kesimlerinde Neojen "bilimlerin oluşturduğu soğuk su akiferi sabit sıcaklık sınırı olarak tanımlanmıştır. Ömer-Gecek jeotermal sisteminin beslenme bölgesinde ve model alanının kuzeyi ve batısında hidrostatik basınçtan kaynaklanan bir sabit basınç sınırı tanımlanmıştır. İnceleme alanında halen çalışır durumda olan 12 adet kuyu aracılığı ile sabit debi ile yılın 210 günü çekim yapıldığı göz önüne alınmış, model 20 yıl süre ile çalıştırılarak sıcaklık ve basınçta meydana gelebilecek değişimler belirlenmiştir..

Sonlu farklar grid tasarımı

Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanının HST3D ile sayısal modelinin oluşturulmasında ilk adım model alanının sonlu-farklar gridlerine bölünmesidir. 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 amacı ile her bir hücre 50x50 m²'lik bir alanı temsil edecek şekilde daha sık gridlere bölünmüştür (Şekil 4). Model alanı için hücre boyutları belirlenirken,, akifer parametrelerindeki değişimi temsil edecek, boyutta olmasının yanı sıra model çalışma süresini olumsuz yönde etkilememesi de göz önüne alınmıştır., Afyon Ömer-Gecek alanında,, sıcak sular için bir rezervuar ; özelliği gösteren Afyon Metamorfileri,, üstten geçirimsiz bir örtü ile kaplı olduğu için basınçlı akifer-olarak değerlendirilmiştir.. Akifer, sıcaklık ve basınç gradyanını mümkün olduğunca hassas olarak modele aktarabilmek amacıyla, 8 model katmanına ayrılmıştır. Her katmanın kalınlığı eşit olup, 100 metredir., Katman kalınlığı belirlenirken kuyuların çekim, yaptığı derinlikler ve filtre aralıkları dikkate alınmıştır. Katman sayısının artması model çalışma süresini arttırmaktadır. Bu yüzden katman sayısı kuyuların filtre açıklıklarını yansıtabilecek şekilde ayarlanmıştır. Kuyuların büyük bir kısmının su alma zonları 725-1002 m

kotları arasında bulunmaktadır;. Bununla birlikte AF-13 kuyusu 445-645 m aralığından su almaktadır. Tüm kuyuların modelle-

nebilmesi amacıyla akiferin 300. m ile 1100 m kotları arasındaki bölümü benzeştirilmiştir.



Şekil 4. Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanının gridlere bölünmesi
Figure 4. The grid design of Afyon Ömer-Gecek geothermal field

Sınır koşulları

Isı taşınımı modellerinde, model için belirleyici sınır koşulları sıcaklık ve basınçtaki değişimi ifade eden sabit sıcaklık ve sabit basınç sınır koşullarıdır. İnceleme alanında Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfitlelerinin, alttan bir magmatik sokulumla temasta bulunduğu ve metamorfitleler içerisinde bulunan yeraltı suyunun bu sokulum ile ısındığı varsayılmıştır. Bu yüzden model alanının alt sınırının sabit sıcaklığa sahip yeraltı suyu ile sınırlandırıldığı düşünülerek en alt model katman sabit sıcaklık sınırı (150 °C) 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 aracılı-

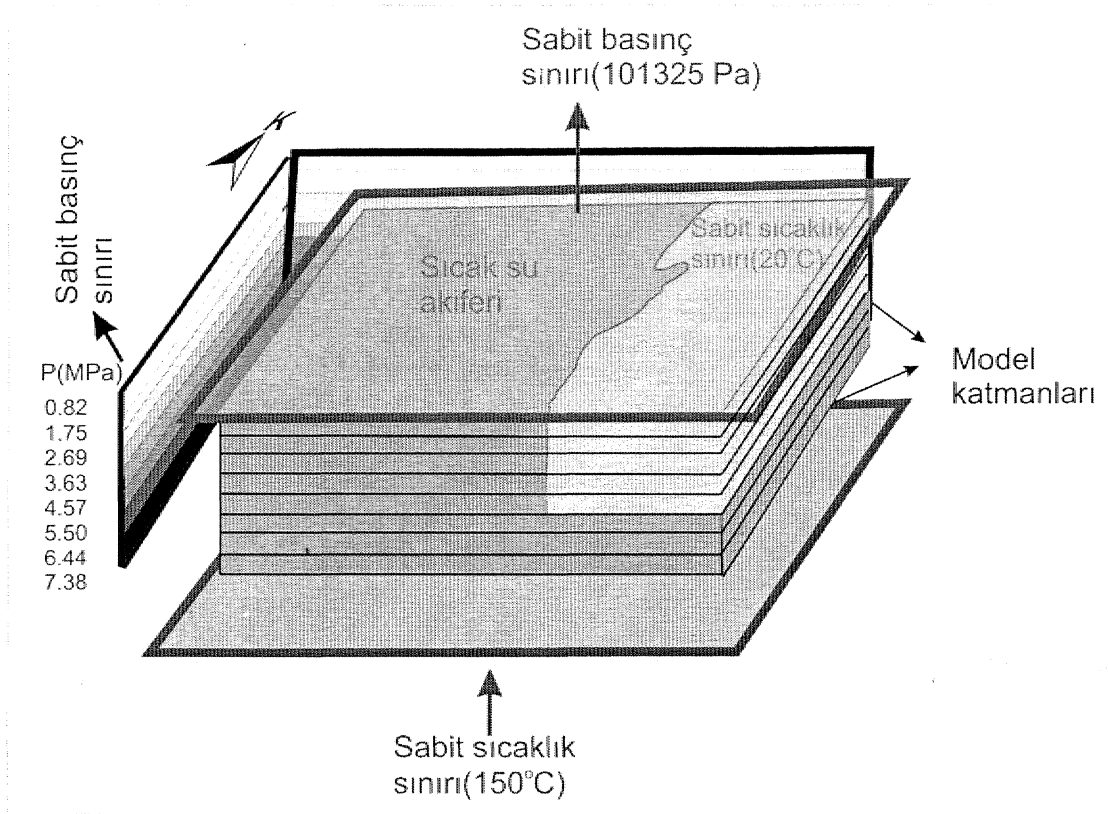
ıyla beslendiği düşünülerek, model alanında üstten sabit basınç sınırı tanımlanmış, 1. model katmanı atmosfere açık olduğu için, sabit basınç değeri atmosferik basınca eşit olarak girilmiştir.

Ömer-Gecek jeotermal alanının sınırları tam olarak bilinmemektedir. Akiferin işletilen kısmının dışında basınç ve sıcaklık değerleri ölçülmemiştir. Bu nedenle sadece işletme bölgesi ve çevresi modellenmiştir. Model alanının yanal sınırları,, akiferin işletilen bölgesinden uzak alınarak (en az 1 km) yanal sınır koşullarının akiferde meydana gelen basınç ve sıcaklık değişimlerine etki etmemesine dikkat, edilmiştir. Yeraltı suyu 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 (Şekil 5).



Şekil 5. HST3D'de model alanı için tanımlanan sınır koşulları

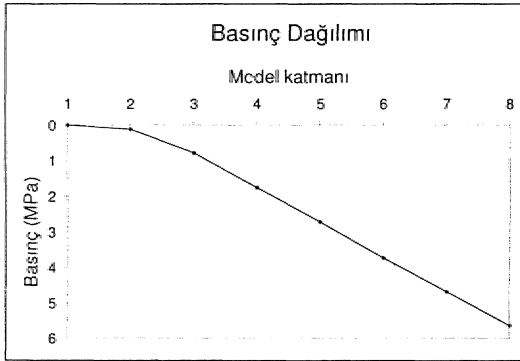
Figure 5. The boundary condition of model area in HST3D

Başlangıç koşulları ve model süresi

Model alanına sistin tavan topografyası aktarılarak, sıcak su akiferinin sınırları tanımlanmıştır. Başlangıç basınç değerleri, MTA tarafından kuyularda yapılan basınç testlerinde elde edilen sabit basınç değerleri kullanılarak üretilmiştir. Modelde, kuyular-

da değişik derinliklerde ölçülen sabit basınç değerlerinden her bir model katmanına 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. Her bir model katmanı için tanımlanan başlangıç basınç ve başlangıç sıcaklık değerleri Şekil 6'da grafiklerle gösterilmiştir., Akifene ait hidrolik ve termal parametrelerin bir kısmı MTA tarafından bölgede yapılan testlerden elde edilen verilerden yararlanılarak hesaplanmış, bir kısmı ise literatürden derlenmiştir (Çizelge 2). Model süresi 20 yıl olarak alınmıştır. Böylece, şu andaki işletme koşullarının 20 yıl süreyle devam etmesi durumunda sistemde meydana gelecek değişikliklerin belirlenmesine çalışılmıştır. AFJET, sıcak su kuyularını Eylül ve Mayıs ayları arasında, şehir ısıtımının yapıldığı dönem boyunca çalıştırmaktadır, Bu nedenle her yıl 150 ve 210 günlük 2 ayrı döneme ayrılmıştır. Dolayısıyla modelde her yıl **210** gün boyunca kuyulardan çekim yapılmış, geri kalan 150 günde ise kuyular çalıştırılmamıştır.



Şekil 6. Model alanı içinde basınç ve sıcaklık değerleri dağılımı

Figure 6. Pressure and temperature distribution in model area

Çizelge 2. Modelde kullanılan akifer hidrolik ve termal parametreleri

Table 2. The hydraulic and thermal parameter of the aquifer used in the model

Model Parametreleri	Referans	Sıcak su akiferi için aldığı değer
Perméabilité (σ^2)	(Akan,2002)	$10T^{12}$
Porozite	(Tezcan vd., 2002)	0.2
Dispersivite katsayısı (m)	(Gelha.ret.aL, 1992)	10
Termal iletkenlik katsayısı ($W/m^{\circ}C$)	Horai (1.971)	10
İsı kapasitesi ($J/m.^{\circ}C$)	(Scharli and Rybach,,2GÖl)	2.24×10^6

Beslenme-boşalım ilişkisi

İnceleme alanında beslenme bölgesini Paleozoyik yaşlı şistlerin yüzeleendiği yüksek kotlar oluşturmaktadır, ancak beslenme miktarına ilişkin kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Beslenme alan yüksekliği yaklaşık 1200 m. civarındadır (Tezcan. vd., 2002). Beslenme süreci model alanının kuzey ve doğu sınırında sabit basınç sınırı, aracılığı ile modellenmiştir. Model alanında basınç değeri sınırdaki basınç değerinden düşük olduğunda hidrolik gradyana bağlı olarak bir yeraltı suyu beslenimi gerçekleşmektedir.

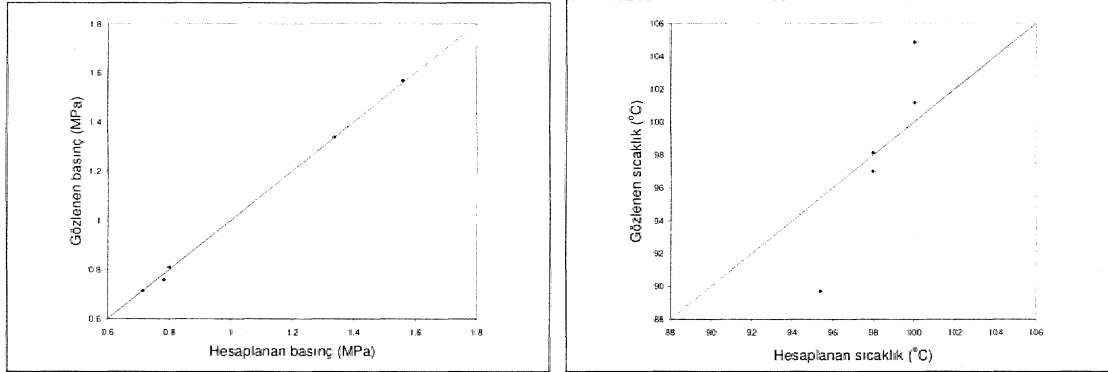
Ömer-Gecek bölgesinde, halen 24 adet kuyu bulunmakta ancak bunlardan 12 tanesi çeşitli nedenlerle çalı sınıamaktadır, geriye kalan 12 kuyu (AF4, AF-9, AF-11, AF-13,, AF-14, AF-16,, AF-17, A.F-2Ö, AF-21, AF-22, AF-23) ise yıl içerisinde belirli zaman dilimlerinde kullanılmaktadır. Bu kuyuların

bir kısmı kaplıca ve otellerin sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılmakta, geri kalan kısmı ise AFJET tarafından Afyon kentinin ısıtılması için kullanılmaktadır. Her bir kuyu için çekim miktarı MTA tarafından yapılan debi ölçümünden yararlanılarak belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 1),

Model kalibrasyonu

Model kalibrasyonu, Tamgaç vd. (2000) tarafından inceleme alanındaki kuyularda yapılan statik basınç ve statik sıcaklık testlerinde elde edilen basınç ve sıcaklık değerleri ile yapılmıştır. Bu testler sırasında kuyudan yapılan çekime karşılık basınç ve sıcaklık değerlerinin derinlik ve zamanla değişimi

belirlenmiştir. Model aracılığıyla aynı zaman aralığında hesaplanan basınç ve sıcaklık değerleri gözlenen değerler ile karşılaştırılmıştır. Gözlenen ve hesaplanan değerler arasında iyi bir uyum sağlandığı için model parametrelerinde bir değişikliğe gidilmemiştir (Şekil 7). Sıcaklık değerlerinde doğrudan uzaklaşan değerler, kalibrasyon sırasında model katmanına karşılık gelen ortalama sıcaklık değerlerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu bilgi göz önüne alındığında bu sapmalar model uyumunu etkilememektedir. Sonuç olarak gözlenen ve hesaplanan değerlere bağlı olarak model parametrelerinin ortamı yeterli bir şekilde temsil ettiği görülmektedir.



Şekil 7, Model sonucunda basınç ve sıcaklık değerleri için elde edilen kalibrasyon grafikleri
 Figure 7. The calibration graphics of pressure and temperature distribution obtained from model results

Hassasiyet analizi

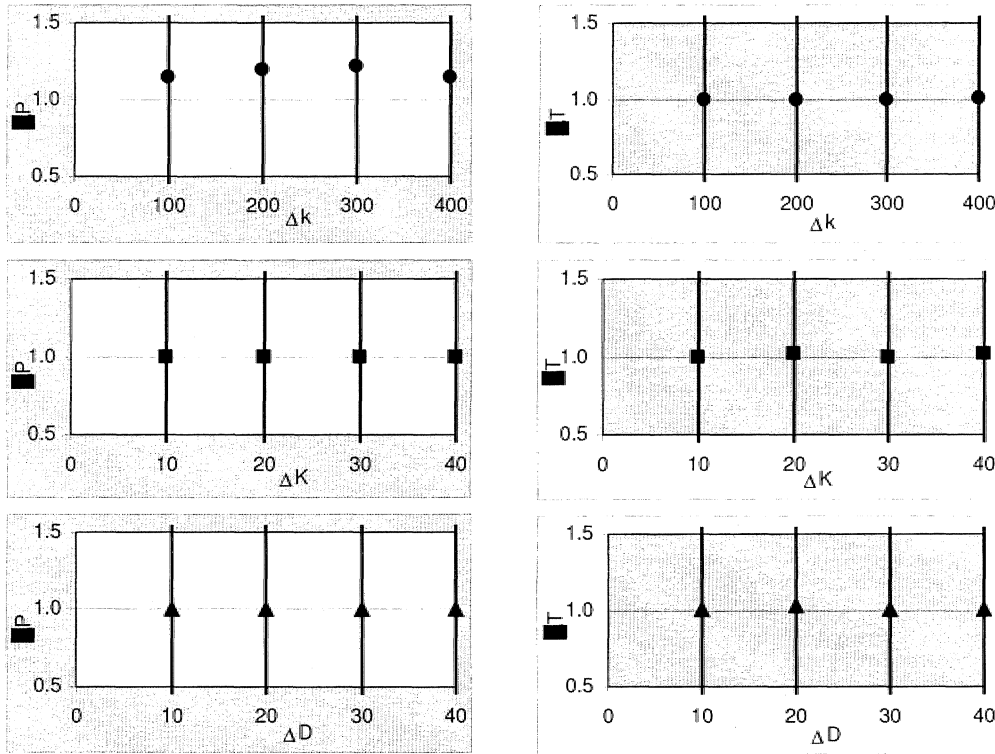
Hassasiyet analizi, modelde kullanılan akifere ait parametrelerin model sonuçlarına etkisini göstermektedir. Model kalibrasyonu yapıldıktan sonra, modele girilen parametre-

lerin kalibrasyon üzerindeki etkisini belirlemek, ve model sonuçlarının doğru olarak yorumlanmasını sağlamak amacıyla hassasiyet analizi yapılmaktadır. Model, belirli bir parametreye karşı hassas ise bu paramet-

rededeği değişim model sonuçlarında önemli ölçüde değişiklik meydana getirecektir. Bu da model sonuçlarının söz konusu parametreye bağımlı olması anlamına gelmektedir. Eğer model parametreye karşı hassas değilse bu parametredeki hata, model tahminleri üzerinde belirleyici bir etkiye neden olmayacaktır.

Modelin, perméabilité (k), termal iletkenlik (K) ve yatay ve düşey yöndeki dispersivite değerlerine göre hassasiyet ana-

lizi yapılmıştır. Bu amaçla, permeabilite, termal iletkenlik ve dispersivite değerleri değiştirilerek model yeniden çalıştırılmış ve bu değerlerin sıcaklık ve basınç değerlerinde meydana getirdiği değişimler yüzde olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen grafikler Şekil 8'de yer almaktadır. Buna göre, perméabilité, termal iletkenlik ve dispersivite değerlerinde meydana gelen değişimlerin model sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.



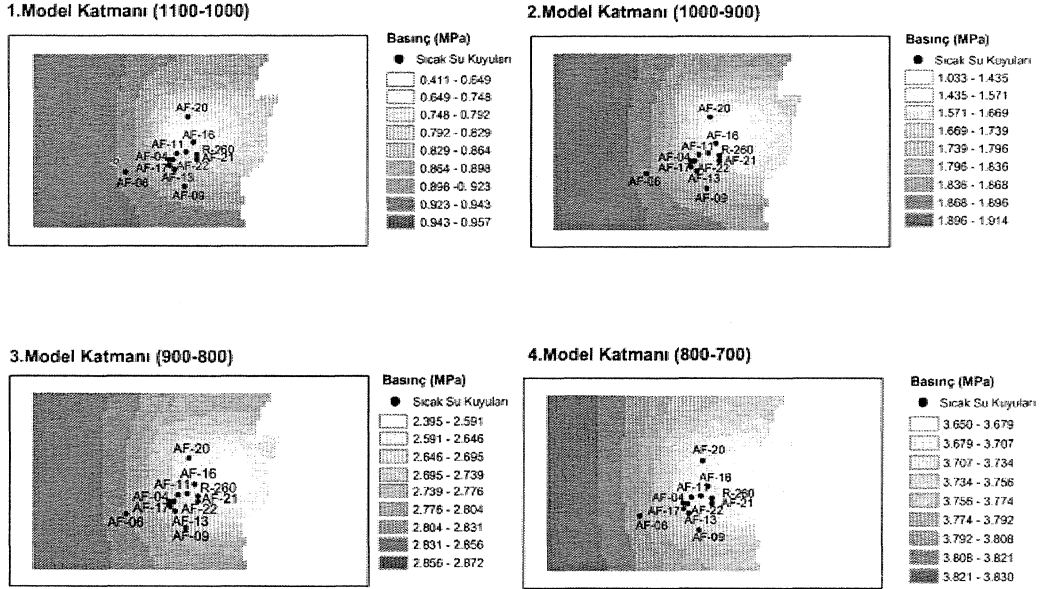
Şekil 8. Hassasiyet analizi sonuçlarının grafiksel değerlendirmesi (k : perméabilité, K : termal iletkenlik, D : dispersivite,, P : basınç, t : sıcaklık)

Figure & The graphical evaluation of sensitivity analyses results (k : permeability, K : thermal conductivity, D : dispersivity, P : pressure, T , \ temperature)

Model sonuçları

Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanı için grid tasarımı yapılmış, sınır koşulları ve başlangıç koşulları belirlenerek HST3D modelinde tanımlanmış ve model 20 yıl süre ile çalıştırılmıştır. Model sonucunda elde edilen basınç ve sıcaklık değerleri grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Modelde tanımlanan 8 model katmanından,, kuyularla yoğun olarak çekim yapılan ilk 4 model katmanına ait sonuçlar verilmiştir, Model ala-

nında ilk 4 model katmanına ait basınç dağılımları Şekil 9'da yer almaktadır, Buna göre 1. model katmanında basınç değerlerinin, 0.41-0.95 MPa (megapascal), 2. model katmanında 1.03-1.91 MPa, 3. model katmanında 2.39-2.87 MPa ve 4. model katmanında 3.65-3.83 MPa arasında değiştiği gözlenmektedir.. Tüm model katmanlarında basınç değerleri model alanının batısına doğru artmakta,, en düşük basınç değerleri sıcak su kuyularının çevresinde görülmektedir.



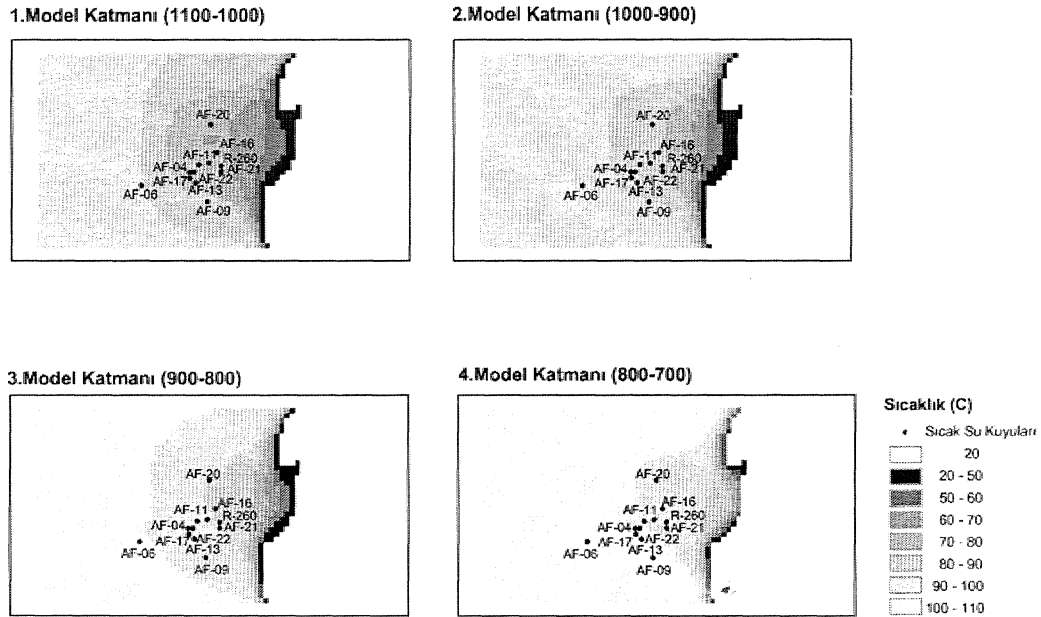
Şekil 9. Afyon Ömer-Gecek bölgesinde HST3D modeli ile hesaplanan basıncın dağılımı
Figure 9, Distribution of calculated pressure values by HST3D in Afyon Ömer-Gecek field

Kuyuların yoğun olarak çekim yaptığı 2. model katmanında kuyuların bulunduğu alanda, model alanının geneline göre 0.8 MPa varan basınç düşüşü gözlenmektedir. Model alanında sıcaklık değerleri 20-110 °C arasında değişmektedir.. Soğuk su akiferinin sınırında 20 °C'e yakın sıcaklık değerleri

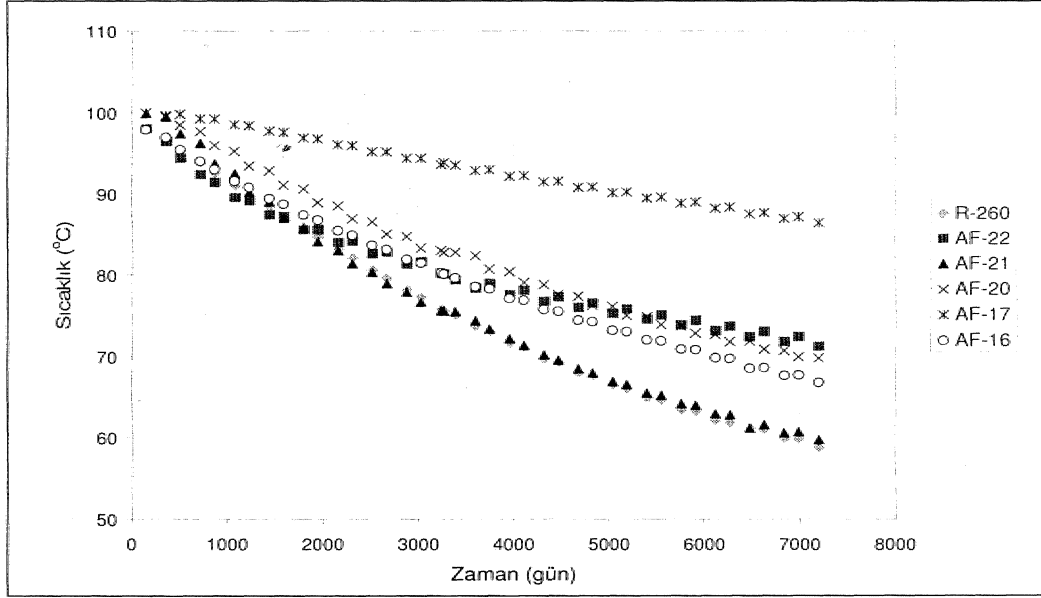
gözlenirken alanın batısına doğru sıcaklık değeri 11.0 °C'e ulaşmaktadır. Model katmanlarında derinlere indikçe sıcaklık değerlerinde genel bir artış gözlenmektedir.. Bu durum,, rezervuara yaklaştıkça sıcaklık değerinde meydana gelen artışı yansıtmaktadır. Ancak özellikle 1. ve 2. model katman-

lannda. görüldüğü gibi kuyular çevresinde sıcaklık değerinde alanın geneline göre kademeli olarak 20 °C'e yakın bir azalma görülmektedir (Şekil 10).. Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanının mevcut koşullarda işletilmesi durumunda 20 yıl sonunda kuyularda meydana gelebilecek sıcaklık, değişiminin belirlenmesi amacıyla, AF-16, AF-17, AF-20, AF-21, AF-22 ve R-260 numaralı sıcak su kuyuların gözlem noktası olarak seçilmiş ve bu kuyularda meydana gelen, sıcaklık değişimi belirlenmiştir.. 20 yıl süreyle, ısıtma sezonu (210 gün) boyunca kuyulardan çekim yapılarak modelin çalıştırılması sonucu elde edilen sıcaklık değerlerinin grafiksel değerlendirilmesi Şekil 11 'de yer almaktadır. Buna göre, kuyularda 12-38 °C arasında değişen, sıcaklık düşüşü olduğu 'be-

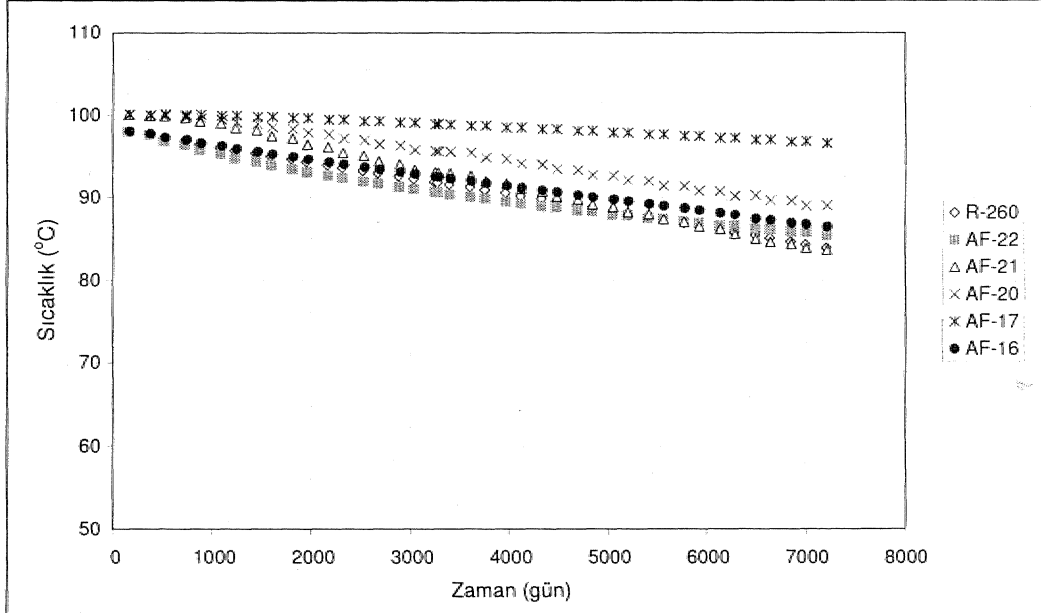
lirlenmiştir.. Bu azalmanın sebebi küçük bir alan içerisinde birbirine yakın kuyulardan yüksek miktarda çekim yapılması ve buna bağlı olarak, kuyuların yoğunlaştığı bölgeye doğru soğuk su girişiminin olmasıdır.. Bu tezi doğrulunun de nenmesi amacı yi a mevcut kuyulardan yapılan çekim miktarı düşürülerek model yeniden çalıştırılmıştır. AFJETin 4500' konutu ısıtmak için ihtiyacı olan sıcak su miktarı 13478 m³/gün'dür. Modelde kuyulardan yapılan çekim bu ihtiyacı karşılayacak şekilde ayarlanmış ve elde edilen sonuçlara göre kuyularda 2-10 °C arasında sıcaklık düşüşü olduğu, 20 yıllık model sonucunda kuyularda gözlenen sıcaklıklarla karşılaştırıldığında ise 25 °C'e varan artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 12).



Şekil 10. Afyon Ömer-Gecek bölgesinde HST3D modeli ile hesaplanan sıcaklık değerlerinin dağılımı
Figure 10., Distribution of calculated temperature values: by HST3D in Afyon Ömer-Gecek field



Şekil 11. Modelin 20 yıl süre ile çalıştırılması sonucunda kuyular için hesaplanan sıcaklık değerleri
 Figure 11. The temperature values calculated from the model for wells after 20 years



Şekil 12* Kuyulardan 20 yıl boyunca düşük debi ile çekini yapılması sonucunda hesaplanan sıcaklık, değerleri
 Figure 12. The temperature values calculated from, the model for low discharge conditions after 20 years

Bu sonuçlara göre sıcak su akiferinin mevcut koşullarla uzun süre işletilmesinin kuyularda ciddi sıcaklık düşüşüne sebep olacağı belirlenmiştir, Önümüzdeki dönemde jeotermal enerji ile ısıtılacak konut sayısında meydana gelebilecek artış ve bölgede termal, turizme olan talep artışı göz önüne alınırsa, sıcak su ihtiyacının giderek artması kaçınılmaz görülmektedir. Dolayısıyla, artan sıcak su kullanımına bağlı olarak kuyularda, model sonucunda hesaplanandan daha fazla soğuma meydana gelmesi, de söz konusu olabilecektir. Özellikle şehir ısıtıcılığı için oldukça büyük yatırım yapılan bu sahada, sıcak su akiferinde jeotermal sistemler için kısa sayılabilecek 20 yıllık bir sürede bu derece büyük bir sıcaklık düşüşü meydana gelmesi, hem jeotermal sistemin geleceği açısından hem de ekonomik açıdan olumsuz bir tablo ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, bundan sonra açılacak kuyuların mevcut kuyuların uzağında, alanın değişik noktalarına dağılacak şekilde tasarlanması ve düşük debi ile üretim yapılması gerek kuyular arasındaki sıcaklık etkileşimlerinin gerekse kuyularda meydana gelecek soğumanın önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.,

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışına kapsamında Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanında,, sıcak su dolaşım sistemini ortaya koymak,, mevcut işletme koşullarının, sistem üzerindeki etkisini göstermek ve olası reenjeksiyon faaliyetlerinin

sistemde meydana getireceği değişiklikleri öngörmek amacı ile HST3D modeli kullanılarak sıcak su akiferi modelleri ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Afyon Ömer-Gecek bölgesinde sıcak suların akifer kayacını Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfikleri (mermer ve şist), örtü kayacını ise Neojen yaşlı birimler (Miyosen yaşlı konglomera ve marn üyesi ile Pliyosen yaşlı marn, konglomera, kireçtaşı ve üst marn üyesi) oluşturmaktadır. Jeotermal sistemin ısı kaynağını jeotermal gradyan ve volkanik kay açları oluşturan magma cepleri oluşturmaktadır. Sıcak suların beslenmesi, yüksek kısımlarda yüzeylenen Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri ile bu birimin örtülü olduğu kısımlarda ise örtü kayacını geçirimli kısımlarından ve fay hatları aracılığı ile yan havzalardan gerçekleşmektedir.,
- inceleme alanını temsil eden kavramsal yapı göz önüne alınarak,, modelin alt sınırında sabit sıcaklık sınır tanımlanmış, model alanının tamamı için 9. düğüm katmanında sabit sıcaklık değeri 150 °C olarak girilmiştir. Alanın, ovaya yakın kesimlerinde Neojen birimlerin oluşturduğu soğuk su akiferinin sabit sıcaklıkta bir sınır olduğu düşünülerek,, sıcaklık değeri 20 °C verilmiştir. Ömer-Gecek jeotermal sisteminde sıcak su akiferi ni n, yüksek kesimlerde yüzeylenen Paleozoyik yaşlı şistler aracılığıyla beslendiği düşünülerek,, model alanında üst-

ten sabit basınç sınırı tanımlanmış» 1. model katmanı atmosfere açık kabul edilerek, sabit basınç değeri atmosferik basınca eşit girilmiştir.. Model alanının kuzeyi ve batısında hidrostatik basınçtan kaynaklanan sabit basınç sınırını tanımlamak için, yüzeyde toplam yük 1100 m olarak alınmış ve basınç yükünün derinlikle değişimi belirlenerek modele aktarılmıştır.

Tamgaç vd. (2000) tarafından yapılan testler sırasında belirli derinlikler için ölçülen sıcaklık değerleri modele girilerek model çalıştırılmış ve kalibrasyon yapılmıştır. Model kalibrasyonu sonucunda hesaplanan ve gözlenen basınç ve sıcaklık değerleri arasında iyi bir uyum görülmüş, model parametrelerinin ilksel değerlerinde bir ayarlama yapılmamıştır.

Model sonuçlarının model parametrelerine (perméabilité (k), termal iletkenlik (K) ve yatay ve düşey yöndeki dis persi vi te değeri eri) göre hassası yet analizi yapılmıştır., Elde edilen sonuçlara göre perméabilité, termal iletkenlik ve dispersivite değerlerinde meydana gelen değişimler model sonuçları üzerinde önemli bir etki oluşturmamaktadır..

Model sonucunda elde edilen basınç değerlerinin 0.411-3.830 MPa arasında değiştiği gözlenmektedir. Tüm model katmanlarında basınç değerleri model alanının batısına doğru artmakta, en düşük basınç değerleri sıcak su kuyularının çevresinde görülmektedir, Model alanında sıcaklık değerleri 20-110 °C arasında

değişmektedir. Model katmanlarında derinlere indikçe sıcaklık değerlerinde genel bir artış gözlenmektedir. Ancak özellikle 1. ve 2. katmanlarda görüldüğü gibi kuyular çevresinde sıcaklık değerinde alanın geneline göre kademeli olarak 20 °C'e yakın bir azalma görülmektedir Bu azalmanın sebebi küçük bir alan içerisinde birbirine yakın kuyulardan yüksek miktarda çekim yapılmasıdır.,

Afyon Ömer-Gecek jeotermal alanının mevcut koşullarda işletilmesi durumunda 20 yıl sonunda kuyularda meydana gelebilecek sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla, AF-16, AF-17, AF-20, AF-21, AF-22 ve R-260 numaralı sıcak su kuyuları gözlem, noktası olarak seçilmiş ve bu kuyularda meydana gelen sıcaklık değişimi belirlenmiştir. Buna göre, kuyularda 12-38 °C arasında değişen sıcaklık düşüşü olduğu belirlenmiştir, Bu azalmanın sebebi küçük bir alan içerisinde birbirine yakın kuyulardan yüksek miktarda çekim yapılmasıdır. Bu tezin doğruluğunun denenmesi amacıyla mevcut kuyulardan yapılan çekim miktarı AFJETin 4500 konutu ısıtmak için ihtiyaç duyduğu miktar olan 13473 nrVgün'e düşürülerek model yeniden çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kuyularda 2-10 °C arasında sıcaklık düşüşü olduğu, 20 yıllık model sonucunda kuyularda gözlenen sıcaklığı ki arla karşılaştı rıldığı nda i se 25 °C'e varan artış olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre sıcak su akiferinin mevcut koşullarla uzun süre işletilmesinin kuyularda ciddi sıcaklık düşüşüne

sebeplere olacağı belirlenmiştir, Önümüzdeki dönemi de jeotermal enerji ile ısıtılacak konut sayısında meydana gelebilecek artış ve bölgede termal turizme olan talep artışı göz önüne alınırsa sıcak su ihtiyacının giderek artması kaçınılmaz görülmektedir.,

Bu çalışmada sıcak su akiferi tamamen horpojen bir bütün olarak ele alınmıştır, bunun nedeni akifere ait hidrolik ve termal parametrelerin konumsal değişimi hakkında bir bilgi bulunmamasıdır. Dolayısıyla akiferin heterojenliğini ortaya koymak amacıyla kuyularda sıcaklık, basınç ve basınç toparlanma testlerinin değişik derinlik ve farklı noktalarda yapılması, perméabilite ve dispersi-vitenin alan sal dağılımının belirlenmesi modelin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu verilerin elde edilmesi durumunda söz konusu jeotermal alanda akiferin optimum işletilmesine yönelik somut işletme önerilerinde bulunulması mümkün olacaktır.

Katkı Belirtme

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

mında jeolojik ve hidrojeolojik verilerin toplanması, bilgisayar ortamına aktarılması, ulaşım, konaklama ve arazi çalışmaları sırasında destek sağlanmıştır;. **AFJET** Şirketi sondaj logları ve kuyu testlerine ait sonuçların kullanılması konusunda anlayış göstermiştir., **Yrd. Doç., Dr. Levent TEZCAN** (HÜ, Müh. Fak.), çalışmanın her aşamasında yardımcı ve yol gösterici olmuştur., Prof. Dr., Hasan. **YAZICIGİL**, değerli görüş ve önerileri ile makalenin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur., Yazar yukarıda adı geçen kişi ve, kurumlara teşekkür eder.

Değinilen. Belgeler

- Akan, B., 2002.. Afyon Ömer-Gecek sıcak su akiferi hidrojeoloji! modeli. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi,, Ankara, 90 s (yayımlanmamış).
- Argus Interware, Inc., 1997. User's guide Argus ONE™, Argus Open Numerical Environments — A. GIS modeling system, version 4.0. Jerico, NY,, Argus Holdings,, Limited, 506 pp.
- Ercan,, T., Ölmez E., Matsuda, JX, Nagao, K., and Kita, L, 1994. Chemical and Isotopie features of hot and mineral waters and their gas content from. Northern and Western Anatolia. Energy Bull. Of Turkey,, 1 (2), 10-20..
- Erişen, B., 1972, Afyon-Heybeli (KızıUtilise) jeotermal araştırma sahasının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. MTA Rapor No :5490 (yayımlanmamış).

- Erkan,, Y., Bayhan, R, Tolluoğlu, Ü., Aydar, E., 1996,. Afyon yöresi, metamorfik ve volkanik kayaçlarının jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelenmesi. TÜBİTAK Proje Raporu,, Proje No: YBAG-Ö04/DPT (yayımlanmamış).
- Gelhar, L.W., Welty, C, Rehfeldt, K.R., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resources Research, 28(7),, 1955-1974.,
- GSJ-MTA, 1992. Summary of the GSJ-MTA Cooperative project on the geothermal system in Turkey, examples at Hasandağı-Ziga and Sivrihisar-Sofular-Acıgöl areas in Central Anatolia and Afyon Area in Western Anatolia., Ankara,, 12 pp (unpublished)..
- Horai, K., 1971. Thermal conductivity of rock forming minerals., Journal of Geophysical Research,, 76 (5), 1278-1308.
- Karamanderesi,, İ.H., 1972., Afyon K.24-b paftası delay jeoloji etüdü ve jeotermal alan olanakları hakkında., MTA Rapor No: 5733 (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, I. ve Bulut, V., 1987; Afyon ve dolayının jeolojisi. 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 (yayımlanmamış).
- Scharli, IX, Rybach, L., 2001.. Determination of specific heat capacity on rock fragments. Geothermics, 30, 93-110.
- 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 s (unpublished).
- 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 (yayımlanmamış),.
- Tatlı, S., 1973. Afyon-Gazlıgöl-Sırsuz alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. MTA Rapor No: 2588 (yayımlanmamış).
- Tezcan, L., Meriç,, B.T., Doğdu,, N., Akan, JB., Atilla, A. Ö., Kurttaş, T., 2002. Akarçay havzası hidrojeolojisi ve yeraltisuyu akını 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,, Afyon,» 93 s.