

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 yönü, yönelimi 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-

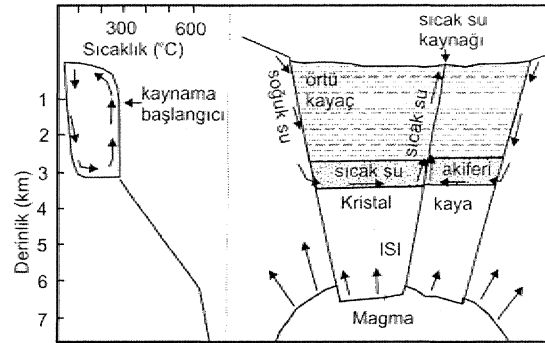
sıncı • kontrol eden faz sıvı fazıdır. Jeobasınçlı sistemler hidrostatik basıncın çok üzerinde akışkan içeren kay aç] ardan oluşan sistemlerdir. Bu sistemler genellikle geçirimsizliği yüksek olan bir örtü kaya ile kaplı olan zonlardan oluşmaktadırlar. Geçirimsiz örtü kaya etkisiyle sistemde sıkışan akışkan, 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 faydalanırlirken, 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 şekildedir:

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

v:hız(L/t), n:porozite, porreferans yoğunluğu(M/L³), η :viskozite(L²/t), μ :suyun hacimsel genişleme katsayısı, p:basınç(M/L²), g: yerçekî mi ivmesi(L/t²), k : ortamın permeabilitesi (L²)'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:

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

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 boşalıklar
- 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 bağılı değışimlerini 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 dağılık 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 beslendiğı 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 basınç 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 değışimi göz ardı etmesi, (2) Grid-blok boyutlarının büyüklüğünden dolayı akışkanın yoğun! aşmayan gaz içeriğı ve ortalama entalpiyi yansıtmaması, (3) Kuyular arası mesafe ve enjeksiyon kuyusunun yeri ile ilgili sorulan cevaplayamamasıdır. Dağılık parametre modelleri ise, rezervuann az veya çok sayıda gride bölünerek benzeştirilebildiğı çok genel modellerdir. Bu tür modeller, jeotermal. sistemin rezervuar, örtü kaya, temel kaya gibi bileşenleri ile beslenme alanı ve sığ soğuksu, **akiferlerinin** modellenmesinde kullanılmaktadırlar. Dağılık parametre modelleri, kayaç özelliklerine bağımlı parametreler ve termodinamik koşulların tanımlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Dağılık 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)

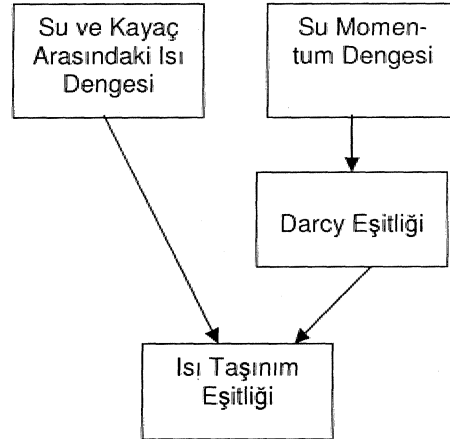
Dh termo mekanik, dispersiyon tensörü (E/LtT)

q_h ısı kaynağı oransal yoğunluğu (E/L³t).

I birim matris (-)

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

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, doymuş 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):

$$P = P_B(x, t), x, S_p \text{ için}$$

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

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

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):

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

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

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

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

q_n^B 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 ısı akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni (W/m^2)

q_n^B kütle akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni ($kg/nT \cdot s$)

S_w^2 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 katkı 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);

$$\rho \cdot c \cdot \frac{d}{dx} T = K \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (18)$$

$\rho \cdot c$ 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.