

## JEOTERMAL SİSTEMLERDE MODELLEME YAKLAŞIMI

Berrin AKAN\*

ÖZ- 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 modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu modeller, jeotermal alanların kavramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanılmaktadır. Jeotermal sistemlerin modellenmesinde esas amaç, rezervuar potansiyelinin belirlenmesi ve reenjeksiyonun sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konması gibi önemli problemlerin çözümüdür. Bu çalışmada, jeotermal sistemlerde ısı taşınımının modellenmesine ilişkin yaklaşımlar kısaca özetlenmiş ve modelleme çalışmalarına temel oluşturan ısı taşınımı eşitlikleri verilmiştir.

### GİRİŞ

Jeotermal enerji üzerine yapılan araştırmaların artmasına paralel olarak gözenekli ortamlarda ısı taşınımının benzeştirilmesi konusunda da 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, 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 ve 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 ve Morrow (1974) tümsel parametre modelini buhar baskın bir sistemde uygulamışlardır. Mercer ve diğerleri (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 ve Pierson (1976), buhar ve sıvı fazında su içeren jeotermal bir rezervuarı benzeştiren bir model geliştirmişlerdir.

Bodvarsson ve diğerleri (1984 *a, b, c*) ve Pruess ve diğerleri (1984), Krafla jeotermal alanında rezervuarın gelecekteki performansının 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 ve diğerleri (1985), sıcak kuru kayaların (HDR) ısı rezervuarı olarak performansını tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmiştir. Bu çalışma sırasında, aktif hidrolik sistemlerin zaman içinde değişime eğilimli olduklarını belirlemişlerdir. Bu nedenle, bir modelleme çalışması yaparken zamanla sistemde değişim meydana gelmesine neden olan fiziksel ve mekanik süreçlerin göz önüne alınarak, hidrolik-mekanik ilişkiler, termal-mekanik ilişkiler, hidrolik-kimyasal ilişkilerin dikkatli tanımlanmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

\* Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara.

Bodvarsson ve diğeri (1986), modelleme alanında süregelen gelişmeleri de göz önüne alarak, jeotermal rezervuarların modellemesine yönelik teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, farklı modelleme yaklaşımlarını tanımlamış, bunların avantaj ve limitlerini tartışmışlardır. Kütle ve ısı taşınım eşitliklerinin oluşturulması ve bunların çözüm teknikleri ile jeotermal rezervuarların modellemesinde karşılaşılan problemleri ortaya koymuşlardır.

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

Kolditz (1995), kırıklı ve çatlaklı kristalen kayalarda, suyun hareketi ile üç boyutlu advectif-konduktif ısı taşınımını incelemiştir. Bu çalışma kapsamında, Fransa Alsace Solutz-Sous-Forets bölgesindeki sıcak kuru kayalarda (HDR) bir model çalışması yapılmıştır. Model kurulurken, benzeştirilen HDR rezervuarlarındaki akım ve advectif taşınımın, 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 taşınımın tanımlanması için, kırıklı çatlaklı gözenekli ortamı temsil eden fiziksel ve matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Pfister ve diğeri (1997), Bursa Gemlik-Orhangazi bölgesinde yer altı suyu akımı ve ısı taşınımına ilişkin bir model çalışması yapmış ve bölgenin jeotermal durumunu ortaya koymuşlardır.

## JEOTERMAL SİSTEMLER

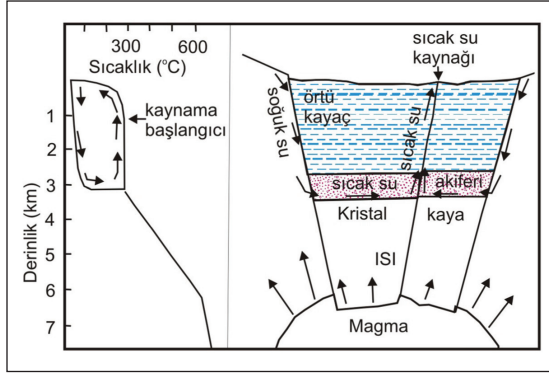
Jeotermal enerji, genel anlamıyla yer küresinin sahip olduğu doğal ısı olarak tanımlanabilir. Bu ısının kaynağı yer kürenin iç yapısı ve bura-

da gelişen fiziksel süreçlerle ilişkilidir. Jeotermal sistemler başlıca üç ana başlık altında sınıflandırılabilirler. Bunlar hidrotermal sistemler, jeobasınçlı (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 basıncı kontrol eden faz sıvı fazıdır. Jeobasınçlı sistemler hidrostatik basıncın çok üzerinde akışkan içeren kayalardan 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 yüze ulaşmaktadır. Sıcak kuru kaya sistemleri ise, ısı taşıyıcı ortam olan suyu içermeyen sistemlerdir (Grant ve diğeri, 1982).

## ISI TAŞINIMI

Jeotermal bir sistemde, termal akiferin incelenmesi sırasında yer altı suyu akımı, ısı taşınımı ve kütle taşınımının birlikte değerlendirilmesi gerekir. Soğuk sistemlerde yeraltı suyunun sahip olduğu enerji hidrolik yük olarak ifade edilmektedir. Bu sistemler izotermal sistemler olarak kabul edilmektedir. Termal akifer sistemlerinde, yer altı suyu hareketi ile birlikte ısı taşınımı söz konusudur. Soğuk su sistemlerinde büyük çoğunlukla suyun kendisinden faydalanılırken, 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 kayaç ve akifere su sağlayan bir beslenme kaynağından oluşmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi bu tür sistemlerde soğuk su; faylar,



Şekil 1- White (1967)'ye göre jeotermal bir sistemde akışkanın doğal sirkülasyonu (Grant ve diğerleri, 1982)

kırık-çatlaklar ve geçirimli özellikteki kayalar aracılığıyla yer altına süzülmekte, 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 ve diğerleri, 1982).

Jeotermal sistemlerde ısının başlıca kaynağı magmatik sokulumlardır. Diğer olası ısı kaynakları ise, kabuksal kayalarda bulunan yüksek miktardaki radyasyon, eksotermik 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, 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 yer altı suyu hareketi ile taşınımıdır. Radyasyon ise, bir kütlein sıcaklığından dolayı yaydığı enerjidir (Domenico ve Schwartz, 1990).

### Kondüktif Taşınım

Kondüksiyon, moleküler titreşim nedeniyle komşu moleküllerin çarpışması yoluyla ortaya çıkan ısı aktarımıdır. 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  $\Delta z$  mesafesinde sıcaklıkta meydana gelen değişim termal gradyan (T.G.) olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$T.G. = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} = \frac{\Delta T}{\Delta z} \cong \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

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

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

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 ve Schwartz, 1990). Bear (1972)'ye göre bu tip ortamlarda yer altı suyu hareketini temsil eden eşitlik şu şekli almaktadır:

$$v = \frac{-k}{\eta \mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{kg\rho_0}{\eta \mu} [1 - \alpha_f (T - T_0)] \frac{\partial z}{\partial x} \quad (3)$$

v:hız(L/t), n:porozite,  $\rho_0$ :referans yoğunluğu ( $M/L^3$ ),  $\mu$ :viskozite( $L^2/t$ ),  $\alpha_f$ :suyun hacimsel genleşme katsayısı, p:basınç ( $M/L^2$ ), g:yerçekimi ivmesi ( $L/t^2$ ), k:ortamın permeabilitesi ( $L^2$ )'dir (L:uzunluk, t:zaman, M:kütle). Eğer basınç dağılımı hidrostatik ise,  $\partial p/\partial x = -\rho_0 g \partial z/\partial x$  olarak ifade edilir ve bir önceki eşitlik aşağıdaki gibi olur:

$$v = \frac{kg\rho_0\alpha_f(T-T_0)}{n\mu} \frac{\partial z}{\partial x} \quad (4)$$

Akımın yatay olduğu yerde,  $\partial z/\partial x=1$  dir.  $\rho_0 g \alpha_f (T-T_0)$  değeri akışkanın birim hacmine etki eden kuvvettir. Akışkan hareketinin Darcy Yasası ile ifade edilebildiği ortamlarda ısı akısı denklemi şöyle ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} q_{Hx} &= -K_{e_x} \frac{\partial T}{\partial x} + n\rho_w c_w T v_x \\ q_{Hy} &= -K_{e_y} \frac{\partial T}{\partial y} + n\rho_w c_w T v_y \\ q_{Hz} &= -K_{e_z} \frac{\partial T}{\partial z} + n\rho_w c_w T v_z \end{aligned} \quad (5)$$

$c_w$ : akışkanın özgül ısısı,  $K_e$ : etkin termal iletkenliktir. Özgül ısı 1g akışkanın sıcaklığında 1°C artış meydana getirmek için gerekli olan ısı miktarıdır ve birimi cal/g°C dir.  $\rho_w c_w$  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:

$$K_e = n.K_f + (1-n).K_s \quad (6)$$

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 ( $\rho'c'$ ) olarak adlandırılır ve şöyle ifade edilir:

$$\rho'c' = n\rho_w c_w + (1-n)\rho_s c_s \quad (7)$$

İzotropik şartlar için Eş. 5 aşağıdaki şekle dönüşmektedir;

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

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

### Kondüksiyon-Konveksiyon eşitliği

Kondüksiyon ve konveksiyon şu eşitlikle tanımlanır:

$$-\text{div}H = -\text{div}[-K_e \text{grad}T + n\rho_w c_w T v] = \rho'c' \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

veya  $K_e, n, \rho_w$  ve  $c_w$ 'nin sabit olduğu varsayımından;

$$K_e \nabla^2 T - n\rho_w c_w [v \nabla T - T \nabla v] = \rho'c' \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Dengeli yer altı suyu akımında  $\Delta.v=0$  olduğundan;

$$K_e \nabla^2 T - n\rho_w c_w v \nabla T = \rho'c' \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

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

$$K_e \nabla^2 T - n\rho_w c_w v \nabla T = 0 \quad (12)$$

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

$$\frac{K_e}{\rho'c'} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{n\rho_w c_w}{\rho'c'} v_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

### JEOTERMAL BİR SİSTEMİN KAVRAMSAL MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Jeotermal bir sistemde meydana gelen süreçlerin ortaya konabilmesi için en önemli aşamalardan biri kavramsal modelin oluşturulmasıdır. Jeotermal bir sistemin yorumlanması, araştırmacının rezervuar hakkında oluşturduğu kavramsal resim, araştırma periyodu sıra-

sında etkin olan fiziksel süreçler ile ölçüm ve yorumlar sonucunda elde edilen verilerin kalitesiyle yakından ilgilidir. Jeotermal sistemlerin yorumlanması sırasında karşılaşılan en önemli problem, rezervuarın 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 yeraltısuyu ve petrol rezervuarlarına ilişkin teori ve teknikler birlikte kullanılmaktadır.

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

- Rezervuar jeolojisi
- Yüzey ve yüzey altı jeofizik verileri
- Rezervuara ait sıcaklık dağılımı
- Rezervuara ait basınç dağılımı
- Düşey basınç gradyanı dağılımı
- Permeabilite dağılımı
- Kimyasal veriler
- Doğal boşalıklar
- Hidrotermal alterasyon zonları
- Kuyuların debileri
- Yer altı 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 ve diğerleri, 1982).

Isı taşınımı modellerine yönelik olarak yapılan jeotermal araştırmalarda elde edilmesi gereken en önemli veri basınç ve sıcaklıktır. 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. Bunun 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 permeabilite değerinin belirlenmesi de mümkündür (Akan, 2002). Ancak kuyu dibinden alınan sıcaklık ve basınç ölçümleri, tam olarak rezervuarın 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 alanında 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, kavramsal model oluşturulurken, termal sulara ait kimyasal türlerin zamana ve konuma bağlı değişimlerini karakterize edecek şekilde planlanmış bir hidrokimya 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 SİSTEMLERİN MODELLENMESİ**

Jeotermal enerji üzerine yapılan araştırmaların artmasına paralel olarak gözenekli ortamlarda tek ve iki fazlı akışkan akımı ve ısı taşınımının benzeştirilmesi konusunda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu modeller, jeotermal alanların kav-

ramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanıldığı gibi, rezervuarın 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 sayısının belirlenmesi mümkündür. Tümsel parametre modelleri, ana rezervuar ve beslediği katmanın modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu tip modeller için geliştirilen eşitlikler yarı 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 entalpisine göre kalibre edilir. Tümsel parametre modellerinin başlıca avantajı basit olması ve çok güçlü bilgisayarlar ihtiyacı duymamasıdır. Bazı dezavantajları ise (1) Rezervuardaki akışkan akımını dikkate almaması ve rezervuar özelliklerindeki değişimi göz ardı etmesi, (2) Grid-blok boyutlarının büyüklüğünden dolayı akışkanın yoğunlaşmayan gaz içeriği ve ortalama entalpiyi yansıtmaması, (3) Kuyular arası mesafe ve enjeksiyon kuyusunun yeri ile ilgili soruları cevaplayamamasıdır. Dağılık parametre modelleri ise, rezervuarın 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. Dağılık parametre modelleri, kayaç özelliklerine bağlı parametreler ve termodinamik koşulların tanımlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Dağılık parametre modellerinin başlıca avantajı, tüm matematiksel yapı bilgisayar kodundadır, kullanıcıya simülasyonun hangi detayda olacağına 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 ve diğerleri, 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 çökmesidir. Bu süreçler, kayaçların permeabilite ve porozitesini değiştirmektedir.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (n\rho c_f + (1-n)\rho_s c_s) T = \nabla \cdot [nK_f + (1-n)K_s] \nabla T + \nabla \cdot nD_h \nabla T - \nabla \cdot n\rho c_f vT + q_h + q\rho^* c_f T^* \quad (14)$$

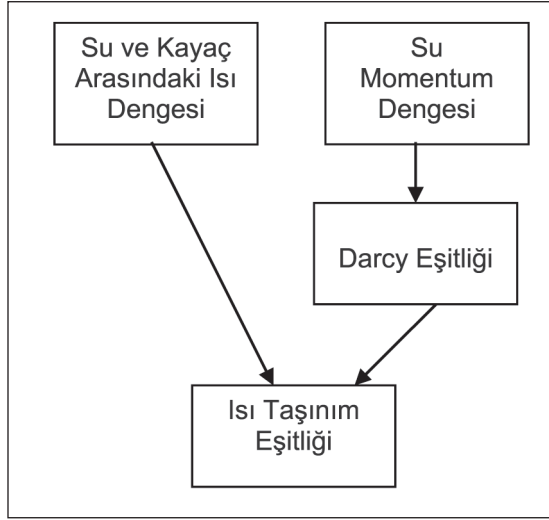
Burada,

- T akışkan ve gözenekli ortamın sıcaklığı (T)
- T\* sabit akışkan girdisinin sıcaklığı (T)
- $\rho_s$  katı fazın yoğunluğu (M/L<sup>3</sup>)
- $c_f$  sabit basınçtaki akışkan fazının özgül ısısı (E/MT)
- $c_s$  sabit basınçtaki katı fazın özgül ısısı (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/L<sup>3</sup>t)
- I birim matris (-)

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

Yukarıdaki eşitlik su ve kayaç arasındaki termal denge varsayımı gözönüne alınarak tü-

retilmektedir (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 ve Faust, 1980)

### Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Isı taşınımı modellerinde ihtiyaç duyulan başlıca parametreler sıcaklık, basınç, termal iletkenlik ve özgül ısıdır. Sıcaklık ve basınç, kuyularda 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 taşınımı modellerinde en önemli parametrelerden biri olan termal iletkenlik değeri ise, iki şekilde ölçülmektedir, birincisi direk arazide ölçüm, diğeri ise alınan 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 kaya-

cın 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 hizadadır ve örneğin ısı iletkenliği standart referans ile karşılaştırma yapılarak ölçülür (Popov ve diğerleri, 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. Kayacın içerisinde zamanla meydana gelen sıcaklık değişimi ise özel sensörler aracılığı ile kaydedilmekte ve böylece kayacın termal iletkenliği ölçülmektedir (Burkhardt ve diğerleri, 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 ve Rybach, 2001).

### Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Fiziksel bir sürecin kısmi diferansiyel eşitlikler yardımıyla çözümünde, çözümü 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 ( $t=0$ ) sınırlar içerisinde aldığı değeri ifade etmektedir. Matematiksel olarak sınır koşulları, sınırların geometrisini ve bağımlı değişkenlerin sınırlarda aldığı değerleri kapsamaktadır. Fiziksel anlamda, yer altı suyu uygulamalarında sınır koşulları genellikle üç grupta toplanmaktadır, bunlar sabit değer (specified value), sabit akı

(specified flux) ve değişkene bağımlı akı (value-dependent flux)dır (Mercer ve diğerleri, 1982).

**Sabit değer sınır koşulu.-** Dirichlet sınır koşulu olarak da bilinen sabit değer sınır koşulunda, yeraltısuyu akım 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):

$$p=p_B(\underline{x}, t), x, S_p^1 \text{ için}$$

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

$$w=w_B(\underline{x}, t), x, S_w^1 \text{ için},$$

$p$  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

$S_w^1$  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 advectif+dispersif, sistemden çıkış olan sınırlarda ise sadece advectif akı söz konusu olmaktadır.

Akılara ait eşitlikler Şu Şekilde ifade edilebilir (Kipp, 1987):

$$q_{Fn} = (q_{Fx}^B, q_{Fy}^B, q_{Fz}^B) \quad x, S_p^2 \text{ için} \quad (15)$$

$$q_{Hn} = (q_{Hx}^B, q_{Hy}^B, q_{Hz}^B) \quad x, S_T^2 \text{ için} \quad (16)$$

$$q_{Sn} = (q_{Sx}^B, q_{Sy}^B, q_{Sz}^B) \quad x, S_w^2 \text{ için} \quad (17)$$

$q_{Fi}^B$  sınırdaki akışkan akısının  $i$  yönündeki bileşeni ( $m^3/m^2-s$ )

$q_{Hi}^B$  sınırdaki ısı akısının  $i$  yönündeki bileşeni ( $W/m^2$ )

$q_{Si}^B$  sınırdaki kütle akısının  $i$  yönündeki bileşeni ( $kg/m^2-s$ )

$q_{Fn}$  akışkan akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni ( $kg/m^2-s$ )

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

$q_{Sn}$  kütle akı vektörünün sınır yüzeyindeki normal bileşeni ( $kg/m^2-s$ )

$S_u^2$  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 sınırı, benzeştirme bölgesindeki iletken ortamın sıcaklık profiline göre belirlenmektedir. Tek boyutlu iletimin, sınırın yüzeyine dik olduğu ve etrafındaki malzemenin iletiminin ise sınıra paralel olduğu farz edilir, çünkü yatay sıcaklık değişimi ihmal edilmektedir. Sınır koşulunu ifade etmek üzere kullanılan tek boyutlu ısı iletim eşitliği aşığıdaki gibidir (Kipp, 1987);

$$\rho_{se} c_{se} \frac{\partial T_c}{\partial t} = K_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial z_n^2} \quad (18)$$

$\rho_{se} c_{se}$  kuyunun etrafındaki malzemenin birim hacminin ısı kapasitesi ( $J/m^3-^{\circ}C$ )

$K_e$  kuyunun etrafındaki malzemenin ısı iletkenliği ( $W/m-^{\circ}C$ )

$T_e$  kuyunun etrafındaki malzemenin sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$z_n$  sınırın koordinatı

İlksel koşul aşığıdaki Şekilde belirlenmektedir;

$$T=0 \text{ için } T_e = T_e^{\circ}(z_n)^{\circ}$$

$T_e^{\circ}$  ilksel sıcaklık profili ( $^{\circ}C$ )

Sınır koşulları,

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

$$z_n=b_{HC}, T_e = T_e^{\circ}(b_{HC}) \quad (20)$$

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

$b_{HC}$  bölgenin dışındaki iletken ortamın etkin kalınlığı (m)

Isı taşınımı modellerinde, model için belirleyici sınır koşulları sıcaklık ve basınçtaki de-



ğişimi 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 modelde başlangıç sıcaklık ve basınç değerleri olarak kullanılmaktadır.

## SONUÇLAR

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 amacıyla modelleme yaklaşımının kullanılması avantaj sağlamaktadır. Termal akifer sistemlerinde, yeraltı suyu hareketi ile birlikte ısı taşınımı söz konusudur. Soğuk su sistemlerinde büyük çoğunlukla suyun kendisinden faydalanılırken, sıcak su sistemlerinde ısısından da faydalanılmaktadır. Bu nedenle, beslenme-boşalım bölgelerinin arasında 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 yeraltı suyu hareketi ile taşınımıdır. Radyasyon ise, bir kütle için sıcaklığından dolayı yaydığı enerjidir. Jeotermal sistemlerin modellenmesinde çekilme eğrisi analizi, tümsel parametre modelleri ve dağınık parametre modelleri olmak üzere başlıca üç tip model kullanılmaktadır. Jeotermal sistemlerin modellenmesinde en önemli aşamalardan biri sistemin kavramsal modelinin oluşturulma-

sıdır. Oluşturulan bu kavramsal model, matematiksel bir takım denklemler yardımıyla matematiksel modele aktarılmaktadır. Fiziksel bir sürecin kısmi diferansiyel eşitlikler yardımıyla çözümünde, çözümü 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.

## DEĞİNİLEN 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 Elsevier Publishing Company, Inc., 764 p.
- Bodvarsson, G.S., Benson, S.M., Sigurdsson, O., Stefansson, V. ve Eliasson, E.T., 1984a. 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. ve Eliasson, E.T., 1984b. 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. ve Eliasson, E.T., 1984c. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 3. The Generating Capacity of the Field. *Water Resources Research*, 20 (11), 1545-1559.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K. ve Lippmann, M.J., 1986. Modeling of Geothermal Systems. *Journal of Petroleum Technology*, September, 1986, 1007-1021.
- Brigham, W.E. ve 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, AIME, San Francisco, California.
- Burkhardt, H., Honarmand, H. ve Pribnow, D., 1995. Test Measurement With a New Thermal Conductivity Borehole Tool. *Tectonophysics*, 244, 161-165.
- Domenico, P.A., ve Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley&Sons, Canada, 317-357.
- 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 (yayımlanmamış).
- Faust, C.R. ve 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.
- Grant, M.A., Donaldson, I.G. ve Bixley, P.F., 1982. *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, New York, 369 p.
- Hopkirk, R.J., Gilby, D.J., Rybach, L. ve 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, O., 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. ve Donaldson, I.G., 1975. A Galerkin finite element analysis of the hydrothermal system at Wairakei, New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 80 (17), 2608-2621.
- Mercer, J.W. ve 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. ve Faust, C.R., 1980. Groundwater modeling: Mathematical models. *Ground Water*, 18 (3), 212-227.
- Mercer, J.W., Faust, C.R., W.J., Miller ve F.J. Pearson, JR, 1982. Review of Simulation Techniques for Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). *Advances in Hydroscience*, 13, 1-129.
- Pfister, M., Rybach, L. ve Şimşek, Ş., 1997. Geothermal Reconnaissance of the Marmara Sea Region. Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project, A Multi-disciplinary Approach by Space-Geodesy, Geology, Hydrogeology, Geothermics and Seismology, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 3-7281-2425-7.
- Popov, A.Y., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F. ve Burkhardt, H., 1999. Characterization of Rock Thermal Conductivity by High-Resolution Optical Scanning. *Geothermics*, 28, 253-276.
- Pruess, K., 1990. Modeling of Geothermal Reservoirs: Fundamental Processes. *Computer Simulation and Field Applications*, *Geothermics*, 19 (1), 3-15.
- Pruess, K., Bodvarsson, G.S., Stefansson, V. ve 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.
- Schärli, U. ve Rybach, L., 2001. Determination of Specific Heat Capacity on Rock Fragments. *Geothermics*, 30, 93-110.
- Thomas, L.K. ve 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. Sci*, 265, 641-684.
- Whiting, D.E. ve Ramey, H.J., Jr, 1969. Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production. *J. Petrol. Tech.*, 21 (7), 893-900.