



## Evrik modelleme tekniğinin yeraltısuyu akım modellerinde kullanılması: Afyon-Şuhut Ovası

*Use of the inverse modeling technique in a groundwater flow model: Afyon-Şuhut Plain*

**Erkan DIŞLI**

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

Geliş (received) : 03 May 2005

Kabul (accepted) : 01 July 2005

### ÖZ

Hidrojeolojik çalışmalarda evrik modelleme yaklaşımı, hidrojeolojik sistem için oluşturulan yeraltısuyu akım modelinde tanımlanan hidrolik yük değerleri ile arazide gözlenen hidrolik yük değerleri arasındaki farkı minimum sağlayacak şekilde parametre optimizasyonu esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım; Afyon-Şuhut Ovası üzerinde denenmiş olup, iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada, Afyon-Şuhut Ovası hidrojeolojik sistemin kavramsal hidrojeolojik yapısı tanımlanmıştır. Heterojen bir yapı gösteren Şuhut Ovası akiferi düşey akım bileşenini de dikkate almak üzere 4 model tabakasına bölünmüştür. Her bir model tabakasında yer alan hidrojeolojik birimler litolojik özellikler göz önüne alınarak 7 farklı zona ayrılmıştır. Her zon kendi içerisinde homojen hidrolik parametreler ile temsil edilmiştir. MODFLOW modelinin gerektirdiği girdi ve çıktı dosyaları oluşturulmuş, bu girdi ve çıktı dosyalarında yer alan parametre ve hidrolik yük değerleri doğrusal olmayan evrik optimizasyon yöntemi PEST programında tanımlanarak çalıştırılmış ve akifer parametre değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler, model alanında yer alan kuyularda yapılan pompalama denemesi verilerinin Neuman yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu belirlenen hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Neuman yöntemi ile çakıl ve tuf birimlerine ait hidrolik iletkenlik katsayıları, 0.35 ve 1.19 m/gün, PEST sonucunda ise 0.168 ve 0.88 m/gün olarak bulunmuştur. Hassasiyet analizleri sonucunda ovadaki akifer sisteminde kestirilen hidrolik yük değerlerinde meydana gelen değişimlerde çakıl ve tuf birimlerine ait hidrolik parametrelerin baskın olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Evrik modelleme, hassasiyet analizleri, hidrolik parametreler, MODFLOW, PEST, Şuhut Ovası.

### ABSTRACT

*In hydrogeological studies the, inverse modeling approach is based on nonlinear parameter optimization which minimizes the difference between the values of hydraulic head described in groundwater flow modeling and observed hydraulic head values. This approach has been applied to the hydrogeologic system of the Afyon-Şuhut Plain. This study consists of two stages. In the first stage, a conceptual hydrogeologic structure of the Afyon-Şuhut Plain is constructed. The Şuhut aquifer was discretized into four model layers in order to consider the vertical flow component. The model area is composed of seven hydrogeological zones, which represent the lithological units in each model layer. The hydraulic parameters are assumed to be homogeneous within each zone. Input and output files of MODFLOW were prepared and the parameters and hydraulic head values in these files were identified in the PEST nonlinear inverse optimization program. The aquifer parameters were then estimated by PEST. These parameters were then compared with hydraulic conductivity values estimated by the evaluation of the pumping test data by Neumann method. The hydraulic conductivity of gravel and tuff units were calculated as 0.35 and*

1.19 m/d by Neuman methods, 0.168 and 0.88 m/d by PEST. As a result of sensitivity analysis, the simulated hydraulic head within the aquifer system in the Şuhut Plain is dominated by the hydraulic parameter of gravel and tuf units.

**Key Words:** Inverse modeling, sensitivity analysis, hydraulic parameters, MODFLOW, PEST, Şuhut Plain.

## GİRİŞ

Akifer sistemlerinde yeraltısuyu akım özelliklerini tanımlamakta kullanılan hidrolik parametreler (depolama ve hidrolik iletkenlik katsayıları vb.), ortamın fiziksel özelliklerine (izotrop, anizotrop, homojen veya heterojen) bağlı olarak konum ve zaman içerisinde değişik değerler almaktadır. Yeraltısuyu akım sistemleri ile ilgili akım problemlerinin çözümünde kullanılan bu parametreler genellikle laboratuvarında noktasal örnekler üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilebildiği gibi arazide bir veya birden fazla pompalama kuyularında yapılan akifer testleri sonucunda elde edilen düşüm-zaman ilişkilerinin değerlendirilmesi ile belirlenmektedir. Pompalama deneyleri ile belirlenen akifer parametreleri akiferin ancak pompalama kuyusunun etki yarıçapı içerisindeki alanı temsil etmektedir. Bununla beraber, pompalama deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılan analitik yöntemler ise (Thiem, 1906; Theis, 1935; Hantush and Jacob, 1955; Hantush, 1961, 1964; Boulton, 1970; Neuman, 1972, 1974, 1975; Moench, 1994, 1995) ancak belirli sınır koşullarında geçerli olmaktadır. Bu yöntemlerin dayandığı genel varsayımlar ise;

- Akifer sonsuz yayılıma sahiptir,
- Akifer homojen, izotrop ve pompalamanın etkilediği bölge içerisinde üniform kalınlığa sahiptir,
- Pompalama verdisi sabittir,
- Pompalama kuyusu akiferin tüm kalınlığı boyunca açılmış olup, kuyuya doğru olan akım yatay olması şeklinde sıralanabilir.

Yukarıda sıralanan varsayımlar nedeniyle analitik yöntemler, akım alanındaki belirli fiziksel koşullar için geçerli ve kullanılan yöntemde belirlenen parametrelerin geçerliliği, akifer ortamının yukarıda tanımlanan genel varsayımlarına ne ölçüde uyduğuna bağlı olmaktadır. Evrik modelleme tekniği ile akifer ortamının tüm sınır koşullarını, heterojenliğini, düşey ve yatay akım koşullarını ve akiferin değişen hidrojeolojik etkiler

altındaki durumunu göz önüne alarak, hidrojeolojik sistem için geliştirilmiş kavramsal yapıya en uygun parametre değerlerini belirlenmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem ile düşümün alansal yayılımından yararlanılarak akifer parametrelerinin alansal dağılımı belirlenebilmektedir. Bunun yanında, analitik yöntemlerde hesaplaması yapılan parametre sayısı iki veya üç parametre ile sınırlı olmasına rağmen, evrik modelleme de sınırlı değildir ve tek çözüm elde edilebilmektedir.

Son yıllarda, analitik çözümlerin gerektirdiği ideal ortam koşullarına karşılık sayısal çözümlü matematiksel modeller kullanılarak, birden fazla akifer-akitard sistemleri, farklı hidrolik iletkenlik değerleri, karmaşık sınır koşulları ve değişik beslenme-boşalım süreçleri gibi değişik hidrojeolojik koşullar modellenebilmektedir. Genellikle fiziksel özelliklere ve deterministik diferansiyel denklemlere dayanan matematiksel modeller, sonlu farklar veya sonlu elemanlar yaklaşımı ile çözülmektedir. Trescott vd. (1976), akifer benzeşiminde sonlu farklar modelinin kullanılması konusunda sayısal çözümler üretmiş, daha sonra McDonald ve Harbaugh (1988,1996), modüller sonlu farklar akım modelinin (MODFLOW) oluşturulması ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yaygın olarak kullanılmaya başlanan yeraltısuyu akım modelleri, parametre tahmini amacıyla son yıllarda evrik modellere dönüştürülmüştür. Yeraltısuyu akım sistemlerinde, parametre tanımlama-evrik problem çözümünde kullanılmak üzere numerik, analitik ve istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler; yayvanlaşma (Emsellem ve de Marsily, 1971), çok amaçlı karar süreci (Neuman, 1973), sonlu elemanlar yöntemi (DiStefano ve Rath, 1975), Gauss-Newton Yöntemi (McLaughlin, 1975), Gauss-Newton yönteminin sonlu elemanlar yöntemine uygulanması (Yoon ve Yeh, 1976), Newton-Raphson Yöntemi (Neuman ve Yakowitz, 1979), şeklinde sıralanabilir. Cooley (1977), akiferlerde iki boyutlu dengeli akım koşullarında yeraltısuyu parametrelerini hesaplamak için doğrusal olmayan en küçük kareler

yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemlerde uygulanan model programlarına örnek olarak SUTRA-INV (Piggott vd., 1994, 1996), MODINV (Doherty, 1990), MODFLOWP (Hill, 1992) ve PEST (Doherty, 1994) gibi iki ve üç boyutlu doğrusal olmayan evrik sayısal modeller verilebilir.

## PARAMETRE KESTİRİM PROBLEMİ

Evrik modelleme ya da parametre kestirimi, herhangi bir modelden elde edilen sonuçların gözlenen ya da deneysel olarak elde edilen değerler ile uyumlu olmasını sağlayan en uygun parametre değerlerinin belirlenme süreci olarak tanımlanmaktadır. Yeraltısuyu akım modellerinde evrik çözüm yöntemleri, arazide ölçülmüş yük ve/veya akım değerleri ile model sonucunda hesaplanan yük ve/veya akım değerleri arasındaki farkın minimum bir değere indirilmesini sağlayan hidrolik parametre dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Evrik problemlerin çözümünde kullanılan yeraltısuyu akım denklemi, iki boyutlu dengesiz yeraltısuyu akımı için aşağıdaki doğrusal olmayan kısmı diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir (Khan, 1986):

$$\frac{\sigma}{\sigma x} \left[ T(x, y, h) \frac{\sigma h}{\sigma x} \right] + \frac{\sigma}{\sigma y} \left[ T(x, y, h) \frac{\sigma h}{\sigma y} \right] = S(x, y, h) \frac{\sigma h}{\sigma t} \mp \varphi(x, y, t) \quad (1)$$

$$T(x, y, h) = K(x, y)h(x, y, t) \quad (2)$$

(Serbest Akifer)

$$T(x, y) = K(x, y)b(x, y) \quad (3)$$

(Basınçlı Akifer)

Burada;  $h(x, y, t)$  hidrolik yük ( $L$ ) veya  $t$  zamanında serbest akiferin doymuş kalınlığı ( $L$ ),  $\rho(x, y, t)$  birim zamanda birim alandan gerçekleşen boşalım veya beslenme miktarı ( $L^3 T^{-1}$ ),  $K(x, y)$  hidrolik iletkenlik katsayısı ( $LT^{-1}$ ),  $b(x, y)$  basınçlı akiferin kalınlığı ( $L$ ),  $S(x, y, h) = S(x, y)$ , gözenekli ortamın depolama katsayısı (birimsiz),  $T(x, y, h) = T(x, y)$  gözenekli ortamın iletkenlik katsayısı ( $L^2 T^{-1}$ ),

Yeraltısuyu akım modellerinde, yeraltısuyu akım sistemini tanımlayan 1 nolu kısmi diferansiyel eşitlikte, hidrolik yük değerleri, bağımlı değişken olarak ele alınmakta ve bilinen akifer parametreleri ve beslenme/boşalım ilişkileri kullanılarak hidrolik yükün konum ve zaman içindeki değişimi hesaplanmaktadır. Yeraltısuyu evrik problemlerinde ise, farklı konum ve zamanlarda bilinen hidrolik yük değerlerinden hareket edilerek, akifer parametreleri ile beslenme/boşalım değerleri kestirilmektedir. Bu durumda kestirilen parametreler, genellikle hidrojeolojik özellikler olup bu özellikler konuma bağlı birer fonksiyondurlar. Evrik problemlerde parametre değerlerinin hesaplanması için, ilk olarak amaç fonksiyonu tanımlanır:

$$E = \sum_{i=1}^N (ho_i - h_i^*)^2 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

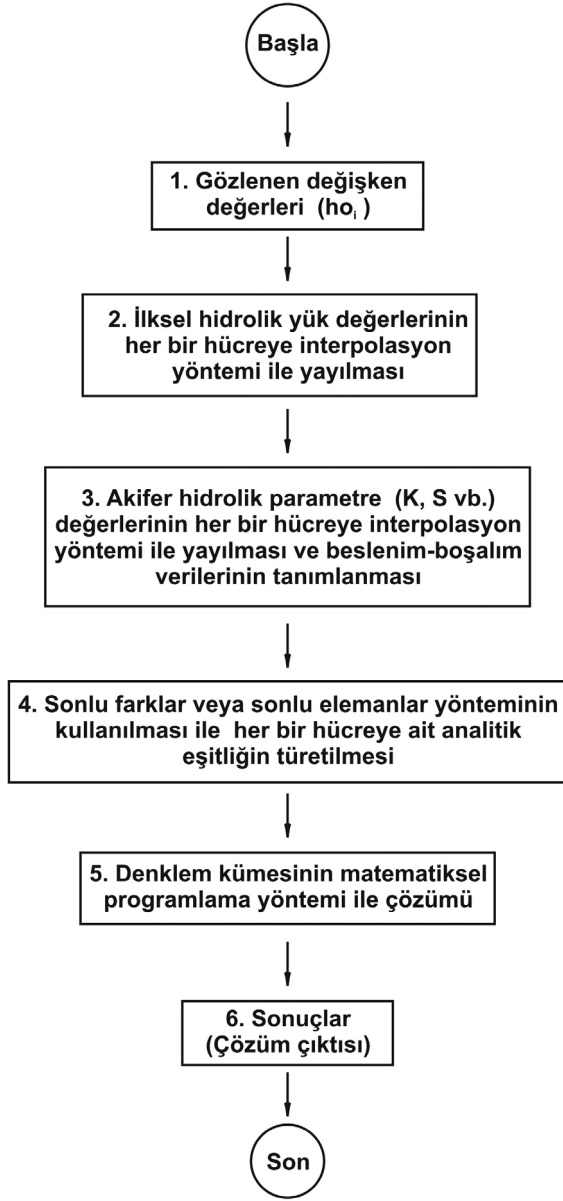
Burada;  $E$  gözlenen ve model sonucunda hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı,  $N$  değişik lokasyonlarda veya zamanlarda yapılan gözlem sayısı,  $ho_i$  gözlemlenen değişken değerleri ve  $h_i^*$  model sonucunda hesaplanan değişken değerleridir.

## Çözüm Teknikleri

Yeraltısuyu akım sistemlerinde parametre kestirimin probleminde kullanılan çözüm algoritmaları doğrudan (Şekil 1) ve dolaylı yöntemler (Şekil 2) olmak üzere olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Neuman, 1973).

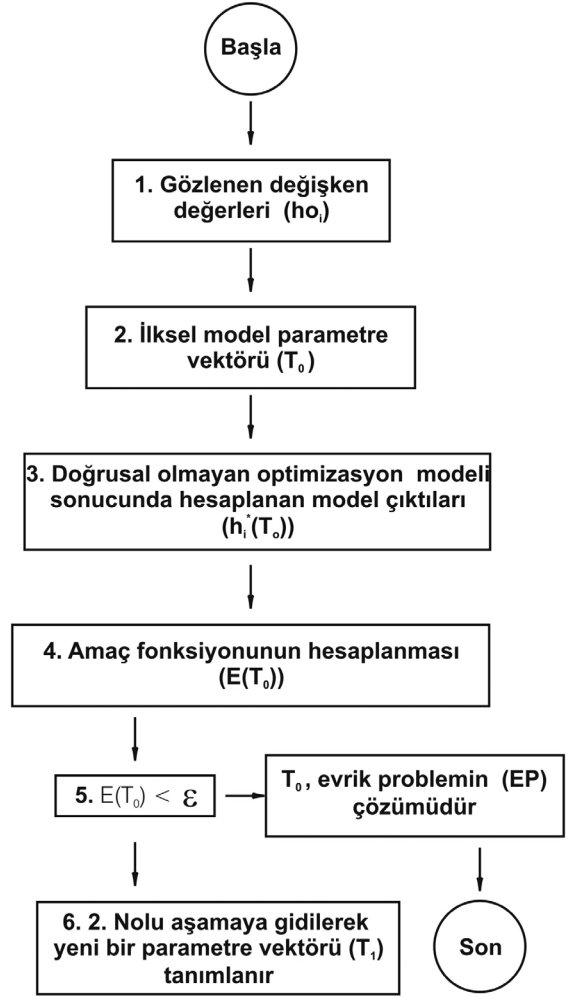
### Doğrudan çözüm yöntemi

Parametre tahmininde, doğrudan çözüm yöntemi, bilinmeyen parametreler değerlerinin doğrudan formülasyonunu gerektirir. Buna göre, hidrolik yük değerlerinin akifer sisteminde her hücrede gözlenebildiği varsayılırsa, yeraltısuyu akım eşitliği sonlu farklar yöntemi kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:



Şekil 1. Doğrudan çözüm yönteminin akım şeması (Sun, 1999).  
Figure 1. Flowchart of the direct method (Sun, 1999).

$$\begin{aligned}
 & (h_{i+1,j}^{k+1/2} - h_{i,j}^{k+1/2}) \times T_{i+1/2,j} - (h_{i,j}^{k+1/2} - h_{i-1,j}^{k+1/2}) \times \\
 & T_{i-1/2,j} + (h_{i,j+1}^{k+1/2} - h_{i,j}^{k+1/2}) \times T_{i,j+1/2} - \\
 & (h_{i,j}^{k+1/2} - h_{i,j-1}^{k+1/2}) \times T_{i,j-1/2} + (h_{i+1,j}^{k+1/2} + \\
 & h_{i-1,j}^{k+1/2} + h_{i,j+1}^{k+1/2} + h_{i,j-1}^{k+1/2}) \times T_{i,j} = \quad (5a)
 \end{aligned}$$



Şekil 2. Dolaylı çözüm yönteminin akım şeması (Sun, 1999).  
Figure 2. Flowchart of the indirect method (Sun, 1999).

$$\frac{2 * (\Delta x)^2}{(\Delta t)} S(h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) + 2 \times (\Delta x)^2 \times \varphi + \varepsilon_{i,j}^{k+1/2}$$

Bu eşitlikte,

$$\begin{aligned}
 \Delta y = \Delta x \quad h_{i,j}^{k+1/2} &= \frac{1}{2} (h_{i,j}^k + h_{i,j}^{k+1}) \quad T_{i+1/2,j} = \\
 & \frac{1}{2} (T_{i,j} + T_{i+1,j}) \quad (5b)
 \end{aligned}$$

olarak alınmıştır. 5a nolu eşitlikte eşitliğin sağ tarafına belirsizlikleri ifade etmek üzere  $\varepsilon_{i,j}^{k+1/2}$  terimi eklenmiştir. Bu terim, gözlemler sırasında

meydana gelen hataların yanı sıra interpolasyon sırasında meydana gelen hataları da içermektedir. Doğrudan yaklaşımda evrik problemde model parametreleri bağımlı değişken olarak tanımlanmakta olup bu yaklaşımın evrik problemlerde uygulanabilmesi için, bütün zaman adımlarında ve bütün hücrelerdeki yük değerlerinin bilinmesi gereklidir. Bu nedenle, noktasal olan bu değerler tüm hücrelere "kübik spline" ya da "kriging" yöntemleri kullanılarak yayılmaktadır.

#### *Hesaplanan ve gözlenen değerler arasındaki farkın minimizasyonu*

Parametre kestiriminde dolaylı yöntem, yeraltı suyu akım denkleminin çözümü sonucunda hesaplanan yük ( $h_i^*$ ) değerleri ile arazide değişik yerlerde gözlenen hidrolik yük ( $ho_i$ ) değerleri arasındaki farkın minimizasyonunu sağlayan akifer parametre değerlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Optimizasyon model çözümü için kullanılan algoritma, model sonuçlarının yeraltı suyu sisteminde gözlemlenen koşulları sağlayana kadar hidrolik parametre değerlerinin güncelleştirilmesidir. Bu minimizasyon probleminde amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir ve eşitlikte T, transpozunu ifade eder.

$$\min J = (ho_i - h_i^*)^T (ho_i - h_i^*) \quad (6)$$

Genellikle, minimizasyon işlemi sırasında Gauss-Newton yaklaşımı (Yoon ve Yeh, 1976) kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, parametrelerin ilksel değerlerinin tahmini ile başlar ve en uygun parametre değerleri belirlenene kadar devam eder.

#### **Hassasiyet Katsayısı**

Hassasiyet analizleri, herhangi bir sistemde bağımlı değişkenlerde meydana gelen değişim sürecinde bağımsız değişkenler olarak tanımlanan parametrelerin etkisini gösteren analizlerdir. Yeraltı suyu akım sistemlerinde bağımsız değişkenler hidrolik iletkenlik (K), depolama (S) katsayıları, bağımlı değişkenler ise hidrolik yük parametreleridir. Yeraltı suyu akım problemlerinde hassasiyet katsayısı, evrik problemlerin çözümünde önemli rol oynayan düşüm ya da hidrolik yük değerlerinin her bir model parametresine göre kısmi türevi olarak tanımlanır (McElwee ve

Yukler, 1978, 1982). Örneğin, iletimlilik (T) ve depolama (S) parametrelerinin düşüme bağlı olan hassasiyet katsayıları aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$U_T(x, t) = \frac{\partial h(x, t; T, S, \varphi)}{\partial T} \quad (7)$$

$$U_S(x, t) = \frac{\partial h(x, t; T, S, \varphi)}{\partial S} \quad (8)$$

Burada;  $U_T(x, t)$  iletimlilik parametresine ait hassasiyet katsayısı ve  $U_S(x, t)$  depolama parametresine ait hassasiyet katsayısıdır.

Bu katsayı, akiferin hidrolik parametrelerini hesaplamak ve hesaplamalarda meydana gelen çeşitli hataların kaynağını belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda, akifer parametrelerinin kalibrasyonu sırasında hidrolik yük değerlerinde nasıl bir değişikliğin meydana geldiğini de gösterir. Model alanında düşük hassasiyet bölgeleri genellikle hidrolik yükün konuma ( $\frac{\partial h}{\partial x}$ ) ve zamana ( $\frac{\partial h}{\partial t}$ ) göre değişim değerlerinin küçük olması ile ilgilidir. Bu durum, hassasiyet katsayısının zamana ve konuma bağlı olarak değişim gösterdiği anlamına gelmektedir. 7 ve 8 nolu eşitliklerdeki gibi tanımlanan hassasiyet katsayısının dezavantajı hassasiyet büyüklüğünün parametrenin birimine ve boyutuna bağlı olarak değişim göstermesidir. Yeraltı suyu akım modellerinde düşüm, tanımlanan başlangıç ve sınır koşullarına bağlı olarak zamanın ve konumun bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Parametreye bağlı düşümün hassasiyet katsayısı ise aynı koşullara bağlı olarak zamanın ve konumun bir fonksiyonu olarak hesaplanır.

#### **EVRIK MODELLEME UYGULAMASI: AFYON-ŞUHUT OVASI**

Bu çalışmada, Orta Anadolu'nun batısında Akarçay Havzası'nda ve Afyon il sınırları içerisinde yer alan Şuhut Ovası'ndaki hidrojeolojik sistemde yeraltı suyu dolaşımını kontrol eden akifer hidrolik parametrelerinin evrik modelleme tekniği ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sahası 38° 37' ve 38° 22' enlemleri ile 30° 30' ve 30° 45' boylamları arasında bulunmaktadır. Drenaj alanı 875 km<sup>2</sup>, ova alanı ise 180 km<sup>2</sup>'dir.

Ovanın topoğrafik yüksekliği, 1120 m ile 1150 m arasında değişir (Şekil 3).

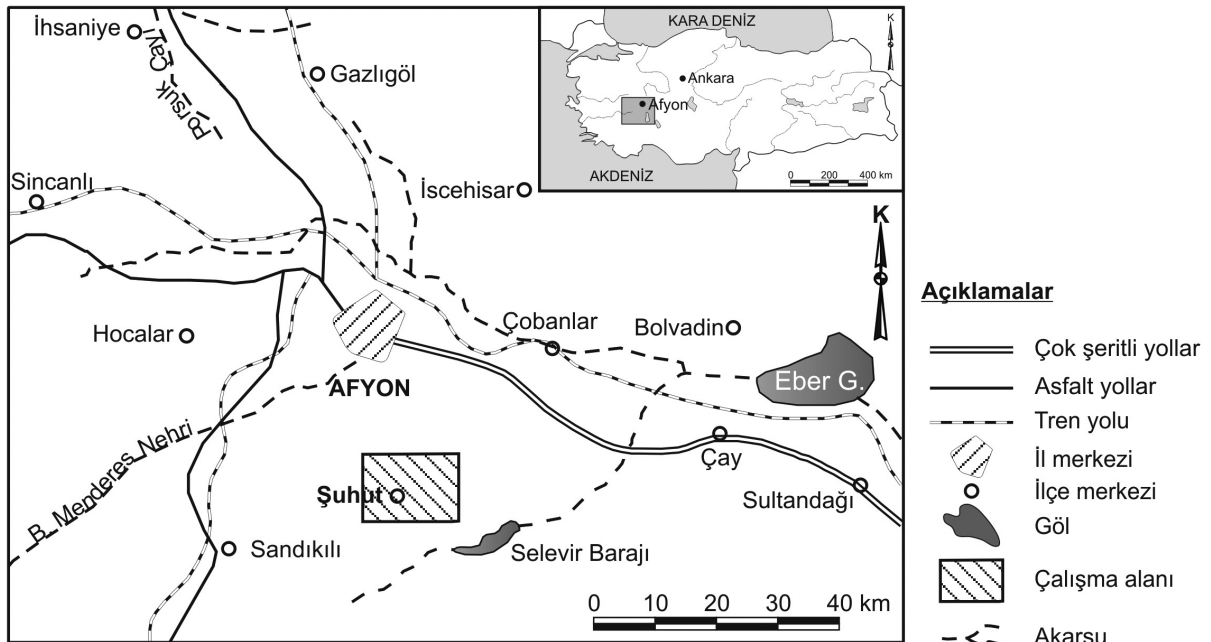
### Genel Jeolojik Durum

Şuhut Ovası ve genelinde Paleozoyik başlangıcından Kuvaterner'e kadar olan döneme ait kayaç toplulukları bulunmaktadır (Tezcan vd., 2002) (Şekil 4). Çalışma alanında Paleozoyik yaşlı temel kayaçlar, kireçtaşları ile temsil edilmiş olup formasyonun üst düzeylerinde kuvarsitler oldukça kalındır. Bölgenin en yaşlı birimi olan kireçtaşları Efeköy yöresinde yüzeylenmekte olup koyu gri mavi renktedir. Ovanın güneyinde geniş bir alanı kaplayan Mesozoyik yaşlı birimler, Triyas'dan Üst Kretase'ye kadar çoğunlukla rekristalize kireçtaşı biriminden ve altta kırmızı renkli çakıltaşı ile başlayan ve üste doğru kırıltı-sarı kumtaşı, marn, şeyl araldanmasından oluşan Üst Triyas-Jura yaşlı birimden oluşmaktadır. Tersiyer, ovanın kuzey ve doğusunda görülen Neojen'e ait kireçtaşları ile temsil edilmektedir. Alüvyon; akarsu yataklarında, havza içinde, ovalarda biriken kum, çakıl, mil türü pekişmemiş güncel çökellerdir. Başlıca çakıllı kumlu seviyelerle temsil edilen olan alüvyon, yer yer ince kil bantları içerir. Volkanik kayaçlar, genel olarak Neojen'de meydana gelmiş ve bü-

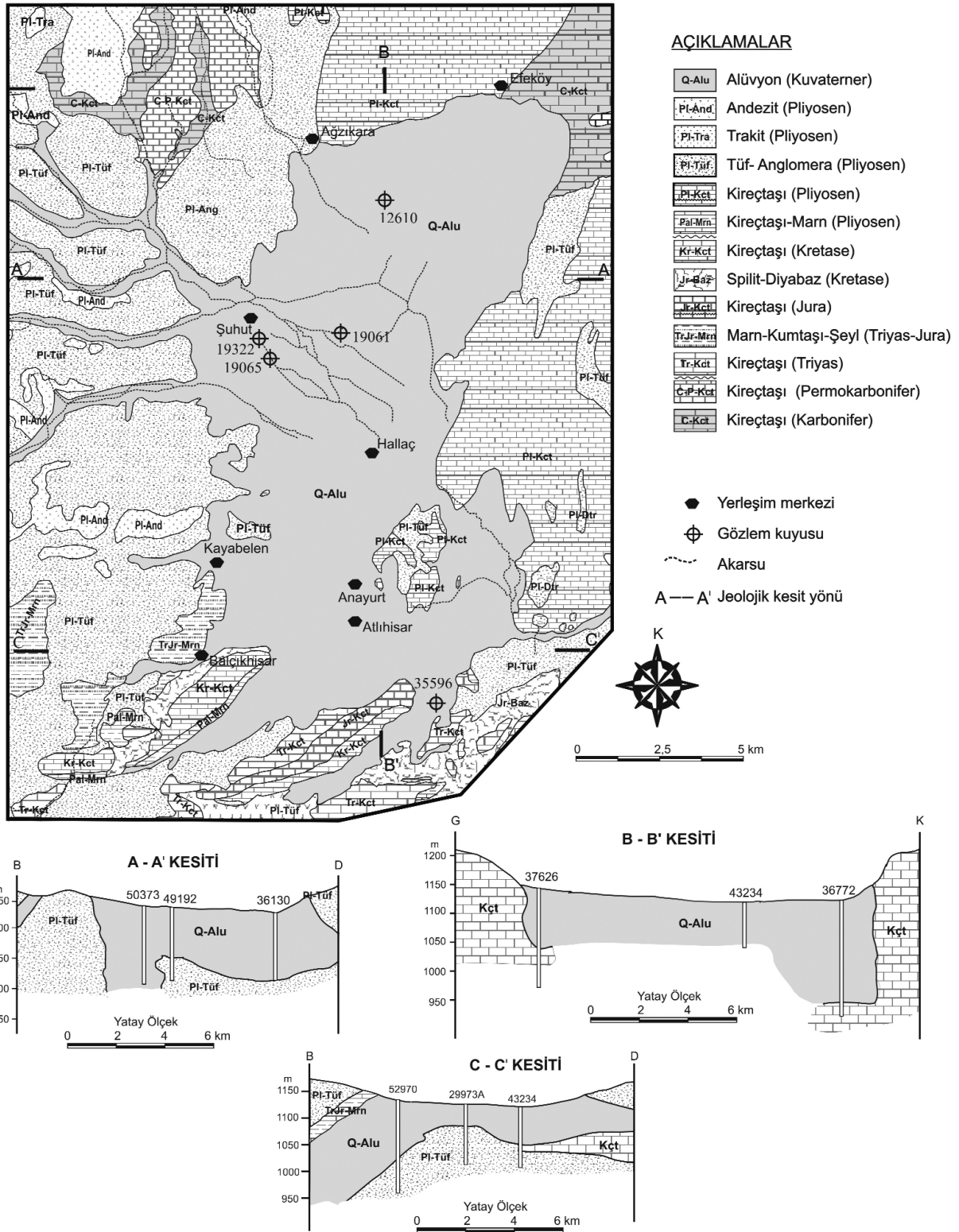
tün sistem boyunca devam etmiş büyük bir volkanizma faaliyetlerin ürünü olarak dasitik tüfler, aglomeralar, trakitler ve trakit tüfler şeklinde bölgede çok geniş alanlar kapladıkları gibi, çok büyük ve yüksek dağlar oluşturmuşlardır.

### Hidrojeolojik Yapı

Şuhut Ovası'nda yeraltısuyu bakımından en önemli formasyonlar, alüvyonun kum ve çakıllı serileri, yamaç molozu, Neojen'in tuf ve aglomeraları ile Neojen ve Mesozoyik kireçtaşlarıdır. Ovada yeraltısuyu taşıyan en önemli birim olan alüvyon, kum, çakıl, killi kum, kumlu çakıl ve killerden oluşmakta olup kuzeyden güneye doğru yayılım göstermektedir (DSİ, 1971). Alüvyonun kalınlığı ovanın kenarlarında 10-30 m., ova ortalarına ise 100-150 metre arasında değişmekte olup en yüksek kalınlık 25615 nolu kuyuda 160 m. olarak belirlenmiştir. Kil, kum ve çakıl seviyeleri homojen bir yayılım göstermemekle beraber, genellikle batıda, güneyde ve orta kesimlerde kum ve çakıllar, kuzeyde kum ve kumlu killi seviyeler, kuzey ve kuzeydoğu ise kil birimleri hakim durumdadır. Akiferin iletkenlik katsayısının (T) hidrojeolojik çalışma alanında açılan kuyularda yapılan pompa testlerinin değerlendirilmesi neticesinde 150-700 m<sup>3</sup>/gün/m arasında



Şekil 3. Çalışma alanının yerbulduru haritası.  
Figure 3. Location map of the study area.



Şekil 4. Çalışma alanının jeoloji haritası (Tezcan, vd., 2002).  
 Figure 4. Geological map of the study area (Tezcan, vd., 2002).

değiştirdiği görülmüştür. Şuhut Ovası'nda akiferin üst sınırı atmosfere açık olup serbest bir akifer koşulu bulunmaktadır.

Ovanın kuzeyinde, Ağzıkara Köyü ile Efeköy arasında başlayan yamaç molozları doğu-batı yönünde bir yayılım gösterir. Neojen yaşlı tuf ve aglomera birimlerinde gelişen kırık ve çatlak sistemleri bünyelerinde yeraltısuyu taşımaktadır. Neojen yaşlı bu birimler ovanın daha çok doğu ve kuzeydoğu bölümünde yayılım göstermekte ve kalınlıkları 30-50 m. arasında değişmektedir. Ovanın kuzey ve doğusunda yayılım gösteren, kalınlıkları 150-200 m. arasında değişen Neojen yaşlı kireçtaşlarında Alpin tektoniğinin etkisiyle meydana gelen kırık çatlak sistemleri bölgede yeraltısuyunu besleyen önemli beslenme alanlarını oluşturmaktadır. Şuhut Ovası'nın güneyinde, drenaj sınırında yüzeylenen tektonik birliklere ait Mesozoyik kireçtaşları, karstlaşmanın çok gelişmiş olmasına karşın çok az bir alanda ve birbirinden kopuk bloklar halinde yüzeylenmeleri nedeniyle önemli bir akifer birimi oluşturmamaktadır. Bu birimlerin boşalımı genellikle ovanın güneyine, havza dışına gerçekleşmektedir (Tezcan vd., 2002). Şuhut Ovası'nda Balçıkhisar batısında yer alan Üst-Triyas-Jura yaşlı kumtaşı-marn-şeyl aralanması geçirimsiz bir yapı sunmaktadır (Tezcan vd., 2002).

### Kavramsal Model

Çalışma alanındaki akifer sisteminde yeraltısuyu akım hareketini ortaya koyan kavramsal modelin oluşturulması amacı ile Şuhut Ovası'nda açılmış sondaj kuyularına ait kuyu logu bilgilerinden ve jeofizik çalışmalarından yararlanılmıştır. Bu amaçla çalışma alanı genelinde yayılım gösteren jeolojik birimlerin düşey ve yatay yöndeki yayılımını ortaya koymak amacı ile kuzey-güney ve doğu-batı doğrultulu jeolojik kesitler çizilmiş (bkz. Şekil 4) ve bu kesitlerden yararlanılarak yeraltısuyu dolaşım zonları ve bu zonları sınırlandıran geçirimsiz-yarı geçirimli birimler tanımlanmıştır. Ova genelinde Kuvaterner yaşlı alüvyon çökelleri morfolojik sistemdeki etken olan, topografya, iklim ve paleocoğrafyadaki değişim süreçlerine bağlı olarak oldukça heterojen bir özellik göstermektedir. Çalışma alanında DSİ tarafından açılmış kuyulara ait kuyu logları ve jeofizik çalışmaları da heterojen yapıyı belirgin bir biçimde göstermektedir. Heterojen bir yapı gösteren çalışma alanı Şuhut Ovası akifer

sistemindeki düşey akım bileşenini de dikkate almak üzere 4 model tabakasına bölünmüştür. En alttaki tabakanın kalınlığı 100 m, ara tabakaların kalınlığı ise 50 m olarak belirlenmiştir. En üstteki tabakanın kalınlığı ise su tablasının konumuna bağlı olarak zamanla değişim gösterdiği kabul edilmiştir (Şekil 5).

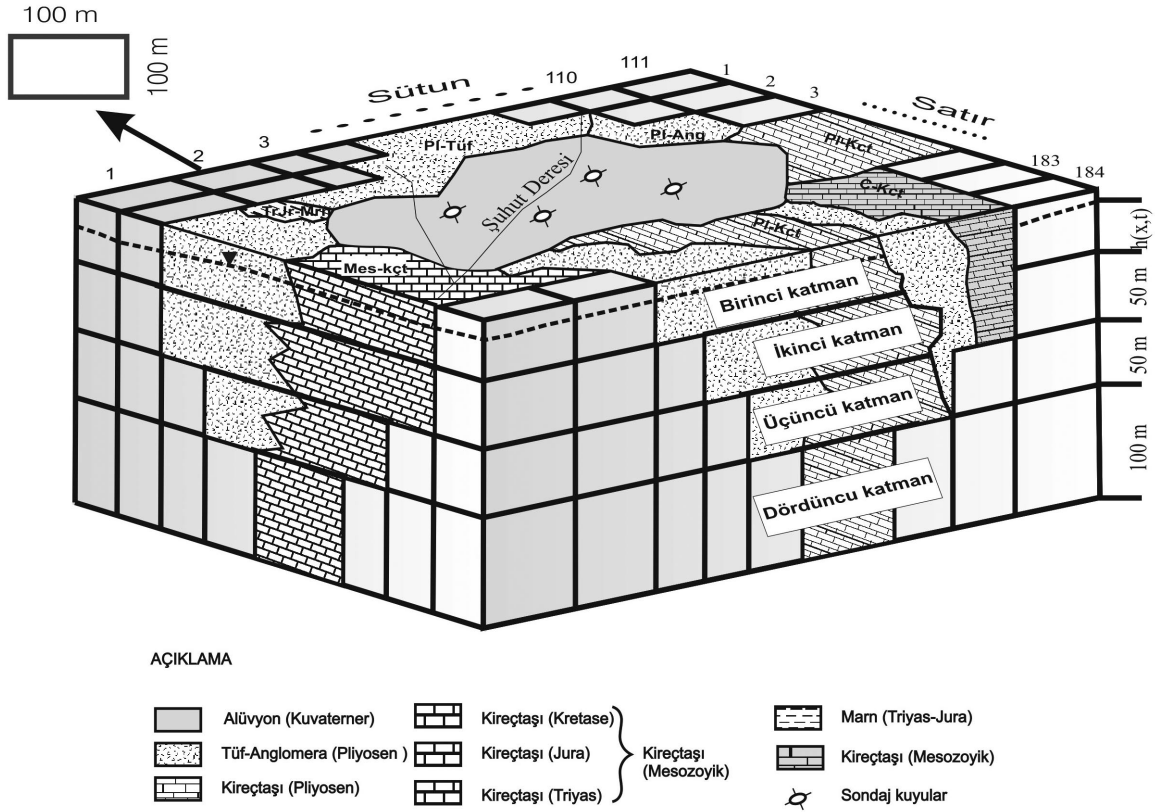
### Yeraltısuyu Akım Modeli

Şuhut Ovası'nda serbest, yer yer basınçlı bir özellik gösteren akifer, MODFLOW-96 3 boyutlu sonlu farklar akım modelinde (McDonald ve Harbaugh, 1996) "serbest-basınçlı geçişli akifer" olarak modellenmiştir. Her bir hücrede hidrolik yük değeri hücre üst kotundan daha yüksek bir değere sahip olduğunda basınçlı akifer koşulları varsayılmakta ve akifer iletimlilik ve depolama katsayısı parametreleri, hidrolik yükün hücre üst sınırından daha aşağıda olması durumunda ise serbest akifer koşulları geçerli olmakta ve hidrolik iletkenlik ile özgül verim değerleri kullanılmaktadır. Kavramsal modelde tanımlanan her bir tabaka, 100 m x 100 m boyutlarında 184 satır ve 111 sütundan, toplam 20424 hücreden meydana gelecek şekilde hücrelere ayrılmıştır.

İnceleme alanında yeraltısuyu akımı dengesiz koşullarda meydana gelmektedir. Bundan dolayı beslenme ve boşalım sürecine bağlı olarak Ocak-1978 ile Aralık-1997 yılları arasında yeraltısuyu seviyesinde meydana gelebilecek değişimleri görmek için 228 adet stres periyodu belirlenmiştir. Her bir periyot bir aylık dönemden oluşmuştur. Her periyot boyunca hidrolik yük seviyesini etkileyecek olan beslenme ve boşalım (beslenme, buharlaşma-terleme, kuyular ile çekim, akarsu-akifer ilişkisi) süreçleri belirlenmiştir (Şekil 6).

Ova genelinde 1958-1997 tarihleri arasında kamu veya özel kuruluşlar tarafından birçok sondaj kuyusu açılmıştır. Açılan bu kuyularda DSİ (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü) tarafından 1978 yılından başlayarak farklı zamanlarda YAS seviye ölçümleri yapılmaktadır. Yeraltısuyu akım modelinde Şuhut Ovası'ndaki akifer sistemindeki ilksel hidrolik yük dağılımının ( $h(x,y,t=0)$ ) belirlenmesinde Ocak-1978 tarihinde kuyularda ölçülen YAS değerleri kullanılmıştır. Bu tarihte YAS gözleminin yapıldığı sondaj





Şekil 5. Afyon-Şuhut Ovası'nın kavramsal modeli (Dişli, 2000).  
Şekil 5. The conceptual model of the Afyon-Şuhut Plain (Dişli, 2000).

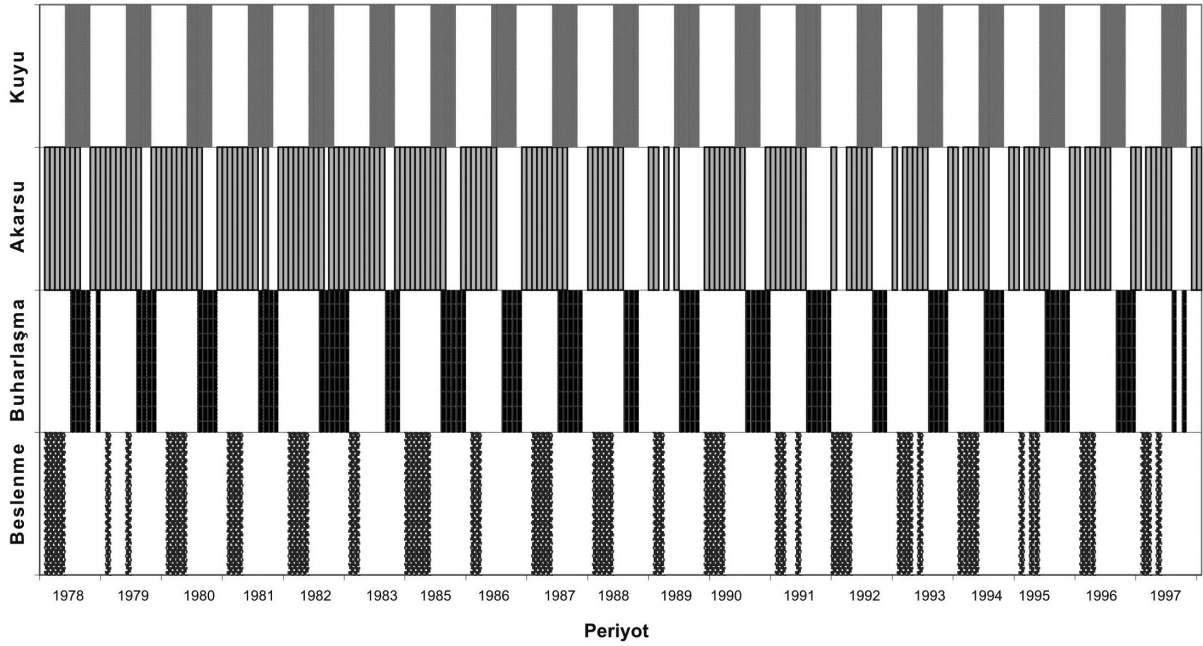
kuyularının konumları itibarıyla akifer sistemindeki YAS dağılımının belirlenmesinde yeterli olacağı kabul edilmiştir. Şuhut Ovasına ait topografya haritasından eş yükseklik eğrileri çizilmiş ve bu eğrilere ait değerlerin her bir hücreye kriging yöntemi kullanılarak yayma işlemi yapılmıştır. Böylece çalışma alanının yüzey kotu haritası oluşturulmuştur.

Yeraltısuyu akım modelinde her periyot için yeraltısuyuna yüzey suyundan olan beslenme miktarı, Penman Yöntemi (1948) kullanılarak belirlenen fazla su değerlerinin %87'si olarak modele aktarılmıştır. Hesaplamalarda, su yılının başlangıcında (Ekim ayı) rezerv su miktarı 0 mm, maksimum rezerv su miktarı ise 100 mm olarak alınmıştır. Buharlaşma-terleme miktarının en yüksek değeri ise eksik su değeri ile tanımlanmış, buharlaşma etki derinliği ise MODFLOW programında ortalama bitki kök derinliği olarak kabul edilen 3 m. alınmıştır. Bu durumda yeraltısuyu seviyesinin yüzeye ulaşması durumunda maksimum buharlaşma değeri kullanılmaktadır.

Su seviyesinin yüzeyden 3 m'den daha derinde bulunması durumunda buharlaşma olmamakta, yüzeye 3 m arasında ise doğrusal olarak azalan bir buharlaşma değeri kullanılmaktadır.

Şuhut Çayı'nın hücrelere ayrılan model alanında hangi hücrelerden geçtiği belirlenmiş ve akarsu tabanını oluşturan birim genellikle kumlu çakıllı tanelerden meydana geldiğinden taban malzemesinin hidrolik iletkenliği 0.1 m/g olarak alınmıştır. Her bir hücrede akarsu kol uzunluğu belirlenmiş ve ortalama 5 m akarsu genişliği alınarak süzülme yüzey alanı belirlenmiştir. Modelde değişken yük sınırı olarak tanımlanan Şuhut Çayı'nda her bir periyot için akarsu su seviyesi, Selevir Barajı giriş noktasında yer alan akım gözlem istasyonundan elde edilen akarsu derinliği değerlerinin topoğrafik eğime uygun olarak akarsu tarafından kesilen tüm hücrelere dağıtılması ile belirlenmiştir.

Ovada, DSİ tarafından 1978 -1997 yılları arasında sulama suyu temini amacıyla açılmış son-



Şekil 6. Her bir stres periyodunda etkili olan beslenme ve boşalım süreçleri (Dişli, 2000).  
Figure 6. Effective recharge and discharge processes within each stress periods (Dişli, 2000).

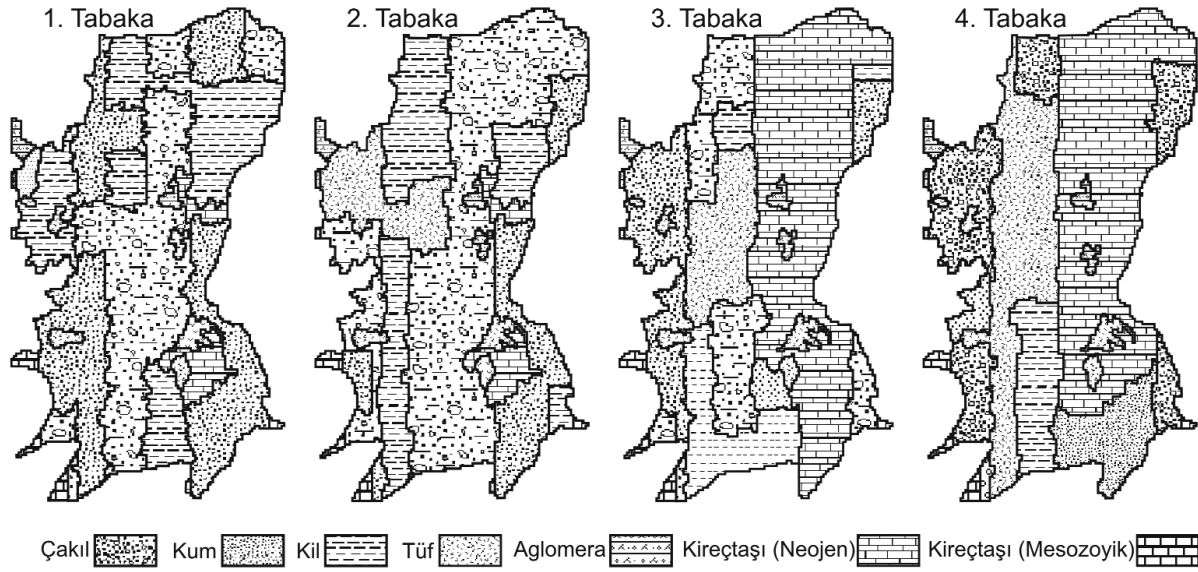
daj kuyuları bulunmaktadır. Değişik tarihlerde işletmeye alınan bu kuyular genellikle 5 aylık sulama mevsiminde çalışmakta diğer mevsimlerde ise kullanılmamaktadır. Ova genelinde yer alan kuyulardan yıllık çekilen su miktarının kuyu sayısına bölünmesi ile her bir kuyudan ortalama çekilen su miktarı 32 l/s olarak hesaplanmış ve kuyular akifer sisteminden boşalımı gerçekleştirdiğinden çekilen su miktarı modelde negatif olarak tanımlanmıştır. Modele her bir kuyu işletmeye alındığı zaman eklenmiş, devre dışı kaldığında ise çıkarılmıştır.

### Evrik Modelleme ile Parametre Kestirimi

Bu çalışmada, parametre kestirimi için PEST (Doherty, 1994) (Parametre Kestirim Programı) kullanılmıştır. PEST, her tür model programı ile kullanılabilen bir doğrusal olmayan optimizasyon programıdır. Model ile hesaplanan bağımlı değişkenler ile gözlemleri arasındaki farkı minimize edecek şekilde, Gauss-Newton algoritması kullanarak model parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirir. Bu optimizasyon programı, model programlarında herhangi bir değişikliğe gerek olmaksızın her tür model ile birlikte kullanılabilir. PEST, parametre boyutlandırma, hem bölgeselendirme hem de ara-kestirim yöntemini kullanabilmektedir (Yeh, 1986).

Afyon-Şuhut ovası hidrojeolojik sistemi üzerinde hidrolik parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılan evrik modelleme yönteminde, hesaplanan ve gözlenen değerler arasındaki farkın minimum bir değere indirgenmesi ve parametreleştirme uygulamalarında ise bölgeselendirme yöntemi kullanılmıştır. Bölgeselendirme yönteminde, her bir tabakayı oluşturan hidrojeolojik birimler, litolojik özellikler göz önüne alınarak 7 farklı alt bölgeye veya zona ayrılmıştır (Şekil 7). Evrik modelleme sonucunda kestirilen parametre sayısı veya boyutu, zon sayısı ile temsil edilmiş (Emsellem ve de Marsily, 1971; Yeh ve Yoon, 1976; Cooley, 1977) ve PEST programında kestirilecek olan her bir parametre grubu için parametre sayısı maksimum 7 ile sınırlandırılmıştır. Her zon kendi içerisinde homojen hidrolik parametreler ile tanımlanmış (Çizelge 1) ve kil-silt gibi az geçirimli birimler geçirimsiz kabul edilmemiş, düşük iletkenlik değerleri ( $10^{-7}$  m/gün) ile temsil edilmiştir. PEST programında akifer parametre kestirim sürecinde ovada yer alan 19065 ve 19061 nolu kuyularda gözlenen YAS değerleri kullanılmıştır.

PEST programında kestirilecek parametrelere ait başlangıç değerleri ile bu parametrelerin alt ve üst sınır değerleri Çizelge 2'de, optimizasyon sonucunda %95 güven aralığı ile hesaplanan



Şekil 7. Katmanlarda litolojik özelliklere göre zonlar (Dişli, 2000).

Figure 7. Zones according to lithological properties in layers (Dişli, 2000).

Çizelge 1. Farklı zonların akifer hidrolik parametre değerleri.

Table 1. Aquifer hydraulic parameters value of zone regions.

Litoloji	K (m/gün)	sf	sy
Çakıl	$4.44 \times 10^{-1}$	$8.00 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-1}$
Kum	$1.30 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-1}$
Tüf	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.70 \times 10^{-2}$	$2.95 \times 10^{-1}$
Aglomera	$1.00 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-2}$
Neojen Kireçtaşı	$1.00 \times 10^{-2}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-2}$
Mesozoyik Kireçtaşı	$7.00 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-3}$
Kil	$1.00 \times 10^{-7}$	$8.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-5}$

K: Hidrolik iletkenlik (m/gün); sf: Depolama; sy: Özgül verim

Çizelge 2. Parametrelerin ilksel, alt ve üst sınır değerleri.

Table 2. Initial parameter data, minimum-maximum limits.

Litoloji	Parametre	İlksel değer	Alt sınır	Üst sınır
Çakıl	hy1	$4.40 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^0$
	sf1	$8.00 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-1}$
	sy1	$2.96 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-1}$
Kum	hy2	$1.30 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^0$
	sf2	$2.00 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-1}$
	sy2	$3.00 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-1}$
Tüf	hy3	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^0$
	sf3	$1.70 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-1}$
	sy3	$2.95 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-1}$
Mesozoyik Kireçtaşı	hy4	$7.00 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^0$

hy: Hidrolik iletkenlik (m/gün); sf: Depolama; sy: Özgül verim

parametre değerleri de Çizelge 3'de gösterilmiştir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

PEST sonucunda inceleme alanında yer alan çakıl ve tüf birimlere ait hidrolik iletkenlik katsayıları için hesaplanan değerler  $0.168 \text{ m/gün}$  ve  $0.881 \text{ m/gün}$  olarak kestirilmiştir (Çizelge 3). İnceleme alanında yer alan ve çakıl biriminden su alan bir kuyuda yapılan pompalama denemesi verilerinin Neuman yöntemi ile değerlendirilme-

si sonucu bu birimlere ait hidrolik iletkenlik katsayıları analitik olarak hesaplanmış ve hidrolik iletkenlik değerleri  $0.35 \text{ m/gün}$  ve  $1.19 \text{ m/gün}$  olarak bulunmuştur. Analitik ve PEST yöntemi ile hesaplanan hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirinden farklı olması tanımlanan zon içerisinde birimlerin heterojen bir özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Analitik yöntem ile hesaplanan hidrolik iletkenlik değeri yalnızca pompalama kuyusunun etki yarıçapı içerisinde kalan bölümü temsil ederken PEST yöntemi ile kestirilen

Çizelge 3. Optimizasyon sonucunda belirlenen parametreler.

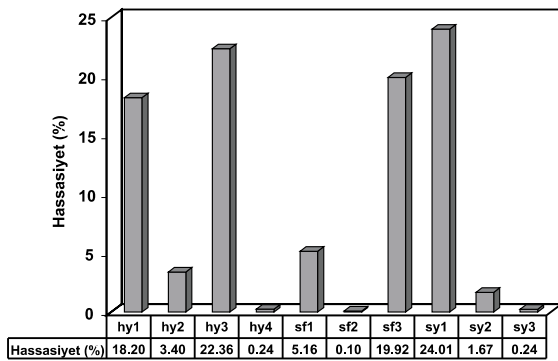
Table 3. Estimated parameters as a result of optimization.

Parametre	Hesaplanan değer	95% Güven aralığı	
hy1	$1.68 \times 10^{-1}$	$1.27 \times 10^{-1}$	$2.22 \times 10^{-1}$
hy2	$3.16 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-2}$	$3.22 \times 10^{-0}$
hy3	$8.81 \times 10^{-1}$	$6.80 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-0}$
hy4	$1.00 \times 10^{-3}$	$6.35 \times 10^{-6}$	$2.78 \times 10^{-3}$
sf1	$1.00 \times 10^{-1}$	$8.67 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-1}$
sf2	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-1}$
sf3	$1.00 \times 10^{-1}$	$4.65 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-1}$
sy1	$3.00 \times 10^{-1}$	$2.18 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$
sy2	$5.86 \times 10^{-2}$	$3.75 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-1}$

hy: Hidrolik iletkenlik (m/gün); sf: Depolama; sy: Özgül verim

hidrolik iletkenlik değeri o birimin tamamını temsil etmektedir.

PEST ile yapılan hassasiyet analiz sonucuna göre akifer sisteminde belirli ilksel ve sınır koşulları altında model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerlerinin, model alanında hassasiyet katsayısı en büyük olan çakıl biriminin özgül verimi (sy1) ve hidrolik iletkenlik katsayısı (hy1), tuf biriminin ise depolama katsayısı (sf3) ve hidrolik iletkenlik katsayısı (hy3) değerlerine bağımlı olarak değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte çalışma alanında en düşük hassasiyet katsayısına sahip kum biriminin (hy2, sf2, sy2) gözlem noktalarında model sonuçlarında (hidrolik yük seviyesi) meydana gelen değişim sürecinde etkin bir parametre olmadığı belirlenmiştir (Şekil 8).

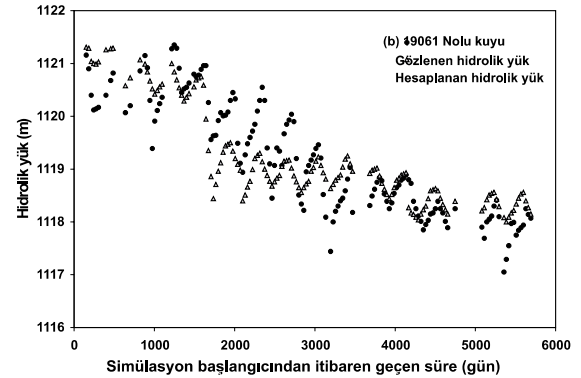
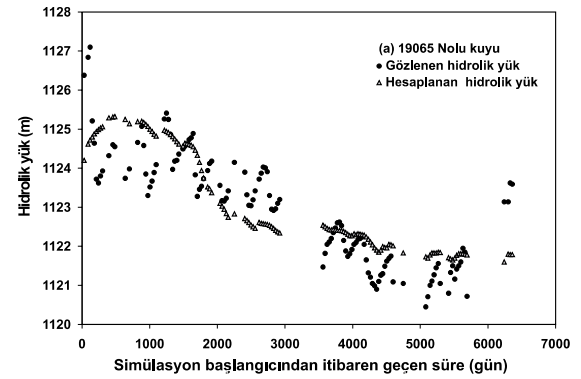


Şekil 8. Hidrolik parametrelerin hassasiyet katsayıları.

Figure 8. The sensitivity coefficients of hydraulic parameters.

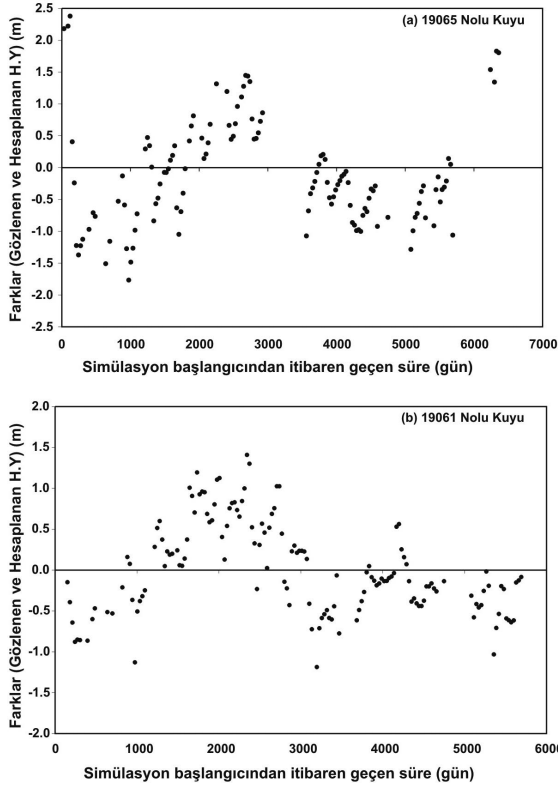
Şekil 9a ve 9b de görüldüğü gibi, ovada yer alan gözlem kuyularındaki (19065 ve 19061) yük değerleri (gözlemlenen hidrolik yük, hesaplanan hidrolik yük), benzeşim süresince değişik değerler almakta ve bu değerlerde, zamana bağlı olarak değişik oranlarda artma ve azalma meydana gelmektedir. Şekil 10a ve 10b incelendiğinde gözlem kuyularında hesaplanan ve gözlemlenen hidrolik yük değerleri arasındaki fark  $\pm 1.5$  m arasında değişiklik gösterdiği hesaplanmıştır. Fark değerlerinde gözlemlenen sistematik olmayan değişimlerin bir kaç nedeni olabilir. Bu nedenlerden birincisi:

1. Bu çalışmada parametre kestiriminde zonlama yöntemi kullanılmış olup bu yöntem akiferin heterojenitesini ve hücreden hücreye hidrolik parametrelerin değişimini dikkate almamaktadır. Özellikle zon sınırlarında hidrolik parametreler keskin bir şekilde değişmektedir. Bu da hesaplanan hidrolik yük değerlerini etkilemektedir.
2. Bununla beraber modele aktarılan beslenme ve boşalım değerlerinde yapılan hatalar bu



Şekil 9. (a) 19061 ve (b) 19065 no.lu kuyularda gözlemlenen ve hesaplanan yük değerleri.

Figure 9. Calculated and observed head data in wells (a) 19061 and (b) 19065.



Şekil 10. (a) 19065 ve (b) 19061 no.lu kuyularda hesaplanan farklar (gözlemlenen yük-hesaplanan yük) ile benzeşim başlangıcından itibaren geçen süre arasındaki ilişki.

Figure 10. Relationship between the estimated differences (the observed head- the calculated head) and time starting of the simulation in wells (a) 19065 and (b) 19061.

farklara neden olabilecek diğer bir neden olabilmektedir. Bu hatalar, beslenme miktarı, maksimum buharlaşma miktarı, akarsu beslenimine ait parametreler, kuyu çekimleri ve bu etkilerin gerçekleştiği periyotların belirlenmesinde yapılan hatalardır.

3. Son olarak hidrojeolojik yapıya ait kavramsal modelin temsil ediciliği de bu farkları ortaya çıkmasına yol açabilir. Yeraltısuyu akım modelinde Şuhut Ovası'nda ova sınırlarının geçirimsiz sınırlar ile çevrili olduğu ve yanal beslenimin olmadığı varsayılmıştır. Simülasyon başlangıcında, ilksel hidrolik yük değerlerinin temsil ediciliği de bu farkları etkileyen bir parametredir. Çünkü 1978 yılında Şuhut Ovası'nda hidrolik yük dağılımını kontrol edecek sayıda yeraltısuyu seviyesi ölçümleri bulunmamaktadır. Bu durum ilksel hidrolik yük değerinin interpolasyonunda hatalara neden olmaktadır.

## ÖNERİLER

Evrik yöntemlerde, simülasyon sayısı, parametre ve tabaka sayısına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, model alanı 4 tabakadan ve hesaplanması gereken parametre sayısı ise 10 tane olduğu varsayılırsa, her bir optimizasyon süreci için modelin 20 kere çalıştırılması gerekmektedir. Bu süreç, günümüzün bilgisayar teknolojisine bağlı olarak birkaç gün almaktadır. Bundan dolayı, model mümkün olduğu kadar basit tutulmalıdır. Bununla beraber, yeterli sayıda gözlem bulunması durumunda, düşey iletimlilik, akarsu taban malzemesinin iletimliliği, buharlaşma etki derinliği, beslenme miktarı gibi değerler de hesaplanmaktadır.

## KATKI BELİRTME

Yazarın, yüksek lisans tezinin bir bölümünü içeren bu araştırmada, Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) ile Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü arasında yürütülen "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli" proje kapsamında toplanan jeolojik ve hidrojeolojik verilerden yararlanılmıştır. Yrd. Doç. Dr. Levent TEZCAN (Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) çalışmanın her aşamasında yardımcı ve yol gösterici olmuştur. Yazar yukarıda adı geçen kişi ve kurumlara teşekkür eder.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Boulton, N.S., 1970. Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers. *Journal of Hydrology*, 10, 369-378.
- Cooley, R.L., 1977. A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow. 1. Theory and numerical properties, *Water Resources Research*, 13 (2), 318-324.
- Distefano, N., and Rath, A., 1975. An identification approach to subsurface hydrological system. *Water Resources Research*, 11 (6), 1005-1012.
- Dişli, E., 2000. Akifer hidrolik parametrelerinin evrik modelleme ile belirlenmesi. Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).
- Doherty, J., 1990. MODINV. Australian Center for Tropical Freshwater Resources. Townsville, Australia.

- Doherty, J., 1994. PEST. Watermark Computing. Co-rinda, Australia.
- DSİ, 1971. Afyon-Şuhut Ovası hidrojeolojik etüt raporu. DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara (yayımlanmamış).
- Emsellem, Y., and Marsily, G. de, 1971. An automatic solution for the inverse problem. *Water Resources Research*, 7 (5), 1264-1283.
- Hantush, M.S., 1961. Drawdown around a partially penetrating well, *Journal of Hydraulic Division, Proceeding American Society of Civil Engineers*, 87, HY4, 83-98.
- Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells. *Advances in Hydroscience*, 1, 281- 432.
- Hantush, M.S., and Jacob, C.E., 1955. Non-steady radial flow to an infinite leaky aquifer, *Transport American Geophysical Union*, 36, 101-112.
- Hill, M.C., 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient three-dimensional ground water flow model using nonlinear regression. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Open-File Report 91-484*.
- Khan, I.A., 1986. Inverse problem in ground water: Model development. *Groundwater*, 24 (1), 32-38.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988. A modular, three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *USGS TWRI, Book 6, Chap. A1*.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. geological survey modular finite-difference groundwater flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Open-File Report 96-485*.
- McElwee, C.D., and Yukler, M.A., 1978. Sensitivity of groundwater models with respect to variations in transmissivity and storage. *Water Resources Research*, 14, 451-459.
- McElwee, D.C., and Yukler, M.A., 1982. Sensitivity analysis and the ground water inverse problem. *Ground Water*, 20 (6), 312-322.
- Mclaughlin, D., 1975. Investigation of alternative procedure for estimating ground-water basin parameters. *Water Resources Engineers, Walnut Creek, California*.
- Moench, A.F., 1994. Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer test data, *Ground Water*, 32 (6), 949-957.
- Moench, A.F., 1995. Combining the Neuman and Boulton models for flow to a well in an unconfined aquifer. *Ground Water*, 33 (3), 378-384.
- Neuman, S.P., 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8 (4), 1031-1044.
- Neuman, S.P., 1973. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. *Water Resources Research*, 9 (4), 1006-1021.
- Neuman, S.P., 1974. Effects of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed aquifer response. *Water Resources Research*, 10 (2), 303-312.
- Neuman, S.P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11 (2), 229-342.
- Neuman, S.P., and Yakowitz, S., 1979. A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology: 1. Theory. *Water Resources Research*, 15 (4), 845-860.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceeding of the Royal Society*, A193, 120-146.
- Piggott, A.R., Bobba, A.G., and Xiang, J., 1994. Inverse analysis implementation of The SUTRA ground water model. *Ground Water*, 32 (5), 829-836.
- Piggott, A.R., Bobba, A.G., and Novakowski, K. S., 1996. Regression and inverse analyses in regional groundwater modelling. *Journal of Water Resour Planning Manage*, 122, 1-10.
- Tezcan, L., Meriç, B.T., Doğdu, N., Akan, B., Atilla, A.Ö. ve Kurttaş, T., 2002. Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM)-Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltı-suyu Akım Modeli", Final Raporu, Ankara (yayımlanmamış).
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysics Union*, 16, 519-524.
- Thiem, G., 1906. *Hydrologische Methoden*. J.M. Gebhardt, Leipzig.
- Trescott, P.C., Pinder, G.F., and Larson, S. P., 1976. Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 7, Chap. C1*.
- Sun, N.Z., 1999. *Inverse Problems in Groundwater Modeling*. Kluwer Academic Publisher.

Yeh, W. W-G., 1986. Review of parameter identification procedure in ground water hydrology: The inverse problem. *Water Resources Research*, 22 (2), 95-108.

Yeh, W. W-G., and Yoon, Y.S., 1976. Parameter identification in an inhomogeneous medium with the finite-element method. *Journal of Society Petroleum Engineers*, 217-226.