

## Kuyu ve Akifer Testlerine Uygulanan Analitik ve Sayısal Yöntemlerle Hidrolik İletkenliğin Belirlenmesi

Gökçen TÜRKKAN ERYILMAZ<sup>1</sup>  
Serdar KORKMAZ<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, kuyu ve akifer testlerinden elde edilen su seviyesi değerleri kullanılarak analitik ve sayısal yöntemlerle akiferin hidrolik iletkenliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Neojen Mühendislik tarafından Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız bir akiferde aralarında 33 m mesafe bulunan iki adet kuyu açılmıştır. Kuyulardan birinde farklı hacimler kullanılarak inkişaf öncesi ve sonrası olmak üzere toplamda 18 adet slug test yapılmıştır. Analitik yöntem olarak Bouwer-Rice ve Dagan metotları, sayısal modelleme için yeraltı suyu akım problemlerini sonlu farklar metodu ile çözen MODFLOW yazılımı kullanılmıştır. Diğer kuyuda ise pompalama testleri yapılmıştır. Kademeli pompalama test verilerine Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh metotları uygulanmış ve debi-düşüm eğrileri elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, geri dönüş testi ve değişken debili pompaj testi ile hidrolik iletkenlik belirlenmeye çalışılmıştır. MODFLOW'da grid çözünürlüğüne ve özgül verime dayalı farklı durumlar için simülasyonlar yapılmıştır. Sonuç olarak, inkişafın kuyu performansını belirgin bir şekilde arttırdığı, slug testte kullanılan hacmin sonuçları etkilemediği ve ayrıca MODFLOW ile modellenen farklı pompalama testlerinin verdiği hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik iletkenlik, slug test, geri dönüş testi, değişken debili pompaj testi, kademeli pompalama testi, MODFLOW.

### ABSTRACT

#### Determination of Hydraulic Conductivity Using Analytical and Numerical Methods Applied to Well and Aquifer Tests

This study aims to determine the hydraulic conductivity of aquifers by analytical and numerical methods applied to water level data obtained from well and aquifer tests. Two wells 33 meters apart were drilled in an unconfined aquifer in Bursa Küçük Sanayi region

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.09.2013 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - geryilmaz@uludag.edu.tr

<sup>2</sup>Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - skorkmaz@uludag.edu.tr

by Neojen Mühendislik. In one of the wells, a total of 18 slug tests were performed using different volumes before and after well development. Bouwer-Rice and Dagan methods were used as analytical methods and MODFLOW software, which solves groundwater flow problems using method of finite differences, was used for numerical modeling. In the other well, pumping tests were performed. Hantush-Bierschenk and Rorabaugh methods were applied to the data from step-drawdown tests and discharge-drawdown curves were obtained. In addition to these, recovery test and multirate test were performed to determine the hydraulic conductivity. In MODFLOW, simulations were made for various cases related to grid resolution and specific yield. It was observed that well development significantly contributes to well performance and the volume used in slug tests does not affect the results. In addition, different pumping tests modeled in MODFLOW yielded similar values of hydraulic conductivity.

**Keywords:** Hydraulic conductivity, slug test, recovery test, multirate test, step-drawdown test, MODFLOW

## 1. GİRİŞ

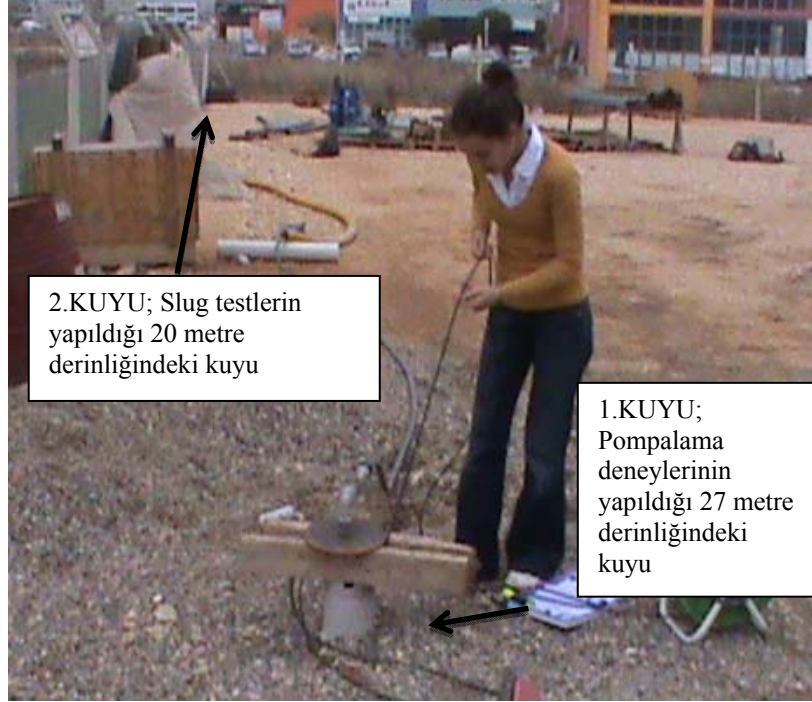
Temel ve vazgeçilmez bir ihtiyaç olan su, günümüzde içme, ev kullanımı, tarımsal faaliyetler, enerji üretimi, sanayi suyu ihtiyaçlarının karşılanmasında olduğu kadar sosyal ve ekonomik kalkınmada da hayati bir öneme sahiptir. Bunun yanı sıra su kaynaklarının stratejik değere sahip olması ve sınırlı miktarda bulunması kaynakların adil ve etkin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Günümüzde iklim değişimine bağlı olarak su kıtlığı oluşmakta ve artan nüfus sınırlı su kaynakları üzerinde bir baskı unsuru oluşturmaktadır. Su, bu denli önem teşkil ederken önemli bir kaynak olan yeraltısularına ayrı bir bilinçle yaklaşıp, değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Son yıllarda büyük gelişmeler gösteren yeraltısuyu kaynaklarını değerlendirme yöntemlerinde, akiferin hidrolik karakteristiklerinin bilinmesi önem kazanmaktadır. Akifere ait parametrelerinin tespit edilmesi, o akiferin davranışı ve özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak demektir. Davranışları ve özellikleri bilinen her şey gibi yeraltı suyunun da kullanımı kolaylık kazanacaktır.

Bu çalışma, yeraltısuyu akım dinamiğini etkileyen akifer parametrelerinden biri olan hidrolik iletkenliğin, basınçsız akiferlerde kuyu testleri ile bulunması amacını taşımaktadır. Bu bağlamda, Neojen Mühendislik tarafından Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız akiferde iki kuyu açılmıştır. Açılan kuyulardan birinde 7, 10 ve 19 lt olmak üzere 3 farklı hacim kullanılarak her biri ile inkişaf öncesi 3 ve inkişaf sonrası 3 adet olmak üzere toplamda 18 adet slug test yapılmıştır. Analitik yöntem olarak Bouwer-Rice ve Dagan Metodu [1], sayısal yöntem olarak da MODFLOW [2] testlerin tamamına ayrı ayrı uygulanarak hidrolik iletkenliğe ulaşılmaya çalışılmıştır. Kuyuyu temizlemek amacıyla yapılan inkişaf işleminin, kuyu civarı hidrolik iletkenliğe etkisi incelenmiş, inkişafın kuyu performansı üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Açılan diğer kuyuda ise farklı debiler ile 5 adet pompalama testi, bir adet geri dönüş testi ve bir adet kademeli pompalama testi yapılmıştır. Pompalama testlerinin her biri, MODFLOW programıyla modellenmiş, grid çözünürlüğüne ve özgül verime dayalı farklı durumlar için simülasyonlar yapılmıştır. Akiferi en iyi temsil eden durum belirlenmeye çalışılmıştır. Geri dönüş testi ve değişken debili pompaj testi ile hidrolik iletkenlik belirlenmeye çalışılmıştır. Kademeli pompalama test verileri kullanılarak, Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh metotları uygulanmış ve bu

kuyu için debi-düşüm eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan iki kuyu birbirinden etkilenmeyecek kadar uzak olduğundan, gözlem kuyusuna dayanan Neuman eğri çakıştırma [3] ve benzeri yöntemler tercih edilmemiştir.

## 2. ARAZİ ÇALIŞMASI

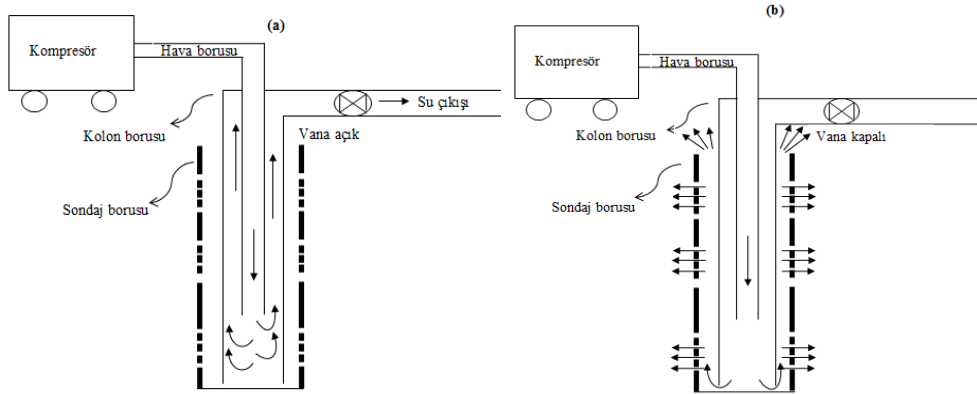
Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız akiferde iki kuyu açılmıştır (Şekil 1). Açılan birinci kuyu 27 metre derinliğindedir ve bu kuyuda pompalama deneyleri yapılmıştır. 20 metre derinliğindeki ikinci kuyuda ise slug testler yapılmıştır. Açılan bu iki kuyu arasında 33 metre mesafe bulunmaktadır. Kullanılan debilerin düşük oluşundan dolayı, gerek deneyler esnasında gerekse MODFLOW sonuçlarında bu iki kuyunun birbirlerinden etkilenmediği görülmüştür.



Şekil 1. Arazide açılan kuyular

Her iki kuyunun açılması sırasında rotary-çamurlu sondaj yöntemi uygulanmıştır [4]. Bu çalışmada her iki kuyuda da matkapla 250 mm çapında delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birinci kuyu 140 mm çapında olup en derinde başlıklı 4 metrelik filtresiz boru üzerine filtrelili boru olmak üzere toplam 7 adet PVC boru indirilmiş ve 27 m sonunda geçirimsiz sert tabakaya rastlanılmıştır. İkinci kuyuya ise aynı şekilde 140 mm çapında 4'er metrelik PVC borulardan 5 adet, en derinde başlıklı ve filtresiz boru üzerine filtrelili borular

indirilerek 20 metrede geçirimsiz sert tabakaya rastlanılmıştır. Borulama işlemi tamamlandıktan sonra çakıllama işlemine geçilmiştir. PVC sondaj borusu ile zemin arası çakılla doldurulmuştur. Bu işlemi yapmaktaki amaç; kuyudan su çekilmesi veya kuyuya su basılması esnasında filtreli kısımların tıkanmasını önlemektir. Çakıllama esnasında bol su verilerek kuyu sondaj çamurundan arındırılmaya çalışılmıştır. Sonraki adım olan inkişaf; kuyunun temizlenmesi işlemidir. Kuyuyu temizleyebilmek için sondaj borusunun içine çapı 63,5 mm olan kolon borusu ve çapı 32 mm olan hava borusu yerleştirilir. İnkişaf sırasında hava borusundan kompresörle hava basılır, kolon borusu yüzeyde ek bir boruya vana ile bağlanır ve böylece inkişaf esnasında çıkan su bir boru yardımıyla dışarıya verilir. Bu işlem vana açık ve kapalı olacak şekilde kuyudan temiz su çıkana kadar tekrarlanır. Vana açıkken (Şekil 2a) basınçlı su, hava borusu ile kolon borusu arasından yukarı çıkar. Vana kapalı (Şekil 2b) durumda iken, kolon borusundan yukarı çıkış olamayacağı için, basınçlı su, sondaj borusundan yukarı doğru çıkarken aynı zamanda filtreli kısımlardan çakıllı bölgeye sızar. Bu sızma işlemi esnasında, çakıllı bölgedeki malzeme, sondaj borusundan uzağa doğru büyükten küçüğe dizilir. Sondaj borusunun gideri olmadığından buradan yukarı çıkan basınçlı su Şekil 2b'de görüldüğü gibi yüzeye püskürür. Vana kapalı durumda yaklaşık 1 saat ve ardından vana açık durumda yaklaşık yarım saatlik periyodlarla dönüşümlü olarak tekrarlanır ve kuyudan temiz su gelmeye başladığında sonlandırılır. Bu şekilde kuyuda inkişaf işlemi tamamlanmıştır. Kuyuya indirilen hava ve kolon boruları çıkartılır. Kuyu kullanıma hazırdır.



Şekil 2. (a) Vana açık durum (b) Vana kapalı durum

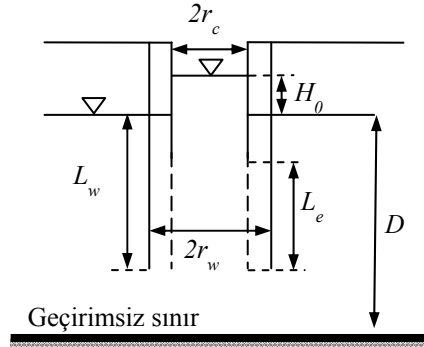
### 3. AKİFER TESTLERİNDE KULLANILAN ANALİTİK METOTLAR

#### 3.1. Slug Testler

Slug test birçok kuyu testine nazaran hızlı yapılabilir ve ucuzdur, test için sadece bir kuyuya ihtiyaç duyulur ve pompalamaya gerek yoktur, test çok uzun sürmez ancak bu metot ile bulunan hidrolik iletkenlik değeri kuyu civarındaki küçük bir bölgeyi temsil eder. Slug test temelde, belli bir hacimdeki külçeyi kuyuya aniden bırakarak veya önceden bırakılan bir külçeyi aniden çekerek kuyudaki su seviyesinin değişiminin ölçülmesi ile yapılır. Külçe yerine belirli bir su hacmi de kullanılabilir. Bu çalışmada testler, kuyuya su bırakılması şeklinde yapılmıştır (Şekil 3). Su bırakılarak kuyu içinde yükselen su seviyesi ilk andan itibaren ölçülür. Su seviyesi hemen düşmeye başlar, düşmekte olan su seviyesi zamana bağlı olarak ölçülür. Ölçüme su seviyesi durağan hale gelene kadar devam edilir. Bu süre zeminin cinsine göre birkaç dakika alabileceği gibi günler boyunca da sürebilir. Slug testler ile hidrolik iletkenlik bulmaya yarayan iki analitik metot aşağıda sunulmuştur.

#### 3.1.1. Bouwer ve Rice Metodu

Bouwer ve Rice Metodu [5],[6],[7] orjinal modeli izotropik durumlar için tanımlanmıştır. Ztolnik [7] anizotropik durumlar için metodu geliştirmiştir. Slug test için bir takım kabuller altında analitik çözümler geliştirilmiştir. Bu kabulleri şu şekilde sıralayabiliriz [3].



Şekil 3. Basıncsız akiferde kuyuya aniden su bırakılmasıyla oluşan durum

1. Akifer, yatay düzlemde sonsuz genişliğe sahiptir.
2. Akifer, homojen, izotropik ve sabit kalınlıktadır.
3. Yeraltı suyunun yoğunluğu ve viskozitesi sabittir.
4. Test öncesinde, akiferdeki su tablası ya da piyezometrik yüzey yatay durumdadır.
5. Kuyudaki hidrolik yük,  $t=0$ 'da aniden değişir ve bu anda kuyu etrafındaki su tablasındaki değişiklik ihmal edilir.
6. Kuyudaki su seviyesindeki salınım ile lineer ve lineer olmayan kuyu kayıpları göz ardı edilebilir seviyededir.

7. Kuyu, akiferin doymun kalınlığını kısmen veya tamamen delmektedir.
8. Kuyu çapı sonludur ve dolayısıyla kuyudaki depolanma ihmal edilemez.
9. Kuyuya giren veya çıkan su yatay yönde iletilir.

Metodun analitik çözümü için aşağıdaki formüller tanımlanmıştır (Şekil 3).

$$H_0 = \frac{V}{\pi r_c^2} \quad (1)$$

$H_0$ =Su bırakıldıktan hemen sonraki yükselme miktarı [L]

$V$ =Bırakılan veya çekilen suyun hacmi [ $L^3$ ]

$r_c$ = filtresiz borunun yarıçapı [L]

$$K = \frac{r_c^2 \ln \left( \frac{R_e}{r_w} \right)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \left( \frac{H_0}{H(t)} \right) \quad (2)$$

$K$ =Hidrolik iletkenlik [ $LT^{-1}$ ]

$r_w$ =Sondaj yarıçapı (çakıl zarfının yarıçapı) [L]

$R_e$ =Yük değişiminin dağıldığı etkili mesafe [L]

$L_e$ =Filtreli kısmın uzunluğu [L]

$t$ =Zaman [T]

$H(t)$ =Zamana bağlı düşüm [L]

$R_e$  aynı zamanda kuyudan itibaren ortalama  $K$  değerinin ölçüldüğü karakteristik mesafedir. Ancak, belirli bir kuyu için  $R_e$ 'nin değeri bilinemez.  $\ln (R_e/r_w)$  değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [5],[6].

- a) Su tablasından kuyu tabanına olan mesafe ( $L_w$ ), akiferin doymun kalınlığından ( $D$ ) küçükse (kuyu akiferi kısmen deliyorsa);

$$\ln \left( \frac{R_e}{r_w} \right) = \left[ \frac{1,1}{\ln \left( \frac{L_w}{r_w} \right)} + \frac{X+Y \ln \left( \frac{D-L_w}{r_w} \right)}{\frac{L_e}{r_w}} \right]^{-1} \quad (3)$$

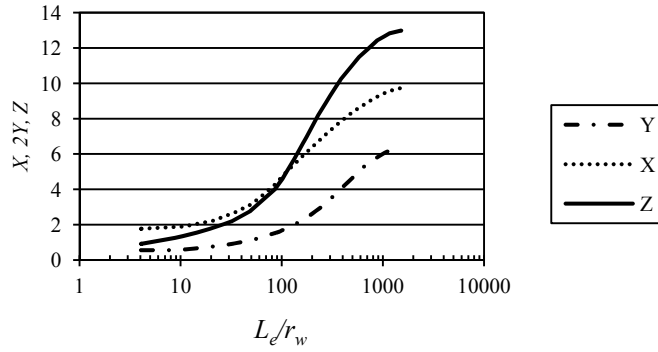
- b)  $L_w=D$  ise;

$$\ln \left( \frac{R_e}{r_w} \right) = \left[ \frac{1,1}{\ln \left( \frac{L_w}{r_w} \right)} + \frac{Z}{\frac{L_e}{r_w}} \right]^{-1} \quad (4)$$

$X$ ,  $Y$ ,  $Z$  boyutsuz parametreleri  $L_e/r_w$  değerine bağlı olup Şekil 4'deki abaktan bulunur. Bulunan hidrolik iletkenlik değeri,  $r_w$  ve  $L_e$  ne kadar büyükse akiferin o kadar büyük bir kısmını temsil eder [1]. İşlem adımları;

1. Öncelikle logaritmik düşey eksene  $H(t)/H_0$  değerleri, aritmetik yatay eksene ise zaman ( $t$ ) değerleri işaretlenir. İşaretlenen noktalara bir düz çizgi uydurulur.
2.  $L_e/r_w$  değerine karşılık gelen  $X, Y, Z$  değerleri Şekil 4'teki abaktan okunur.
3. Yukarıdaki (a) ve (b) durumlarından uygun olan formül seçilir, hesaplanır.
4.  $H(t)=0,368H_0$  seçilerek denklem (2)'de  $\ln(H_0/H(t))$  değeri 1 eşitlenir. Aynı formüldeki  $t$  değerini okumak için erken zaman etkisinden dolayı bir düzeltme uygulanır. Ölçüm eğrisindeki düz çizgi geriye doğru uzatılarak  $y$  eksenini ( $H(t)/H_0$  eksenini) kestiği değer okunur. Bu değer  $(H_0)_{new}/H_0$  oranını verir. Bu oran,  $H(t)/H_0=0,368$  ile çarpılarak yeni düzeltilmiş  $[H(t)/H_0]_{new}$  değeri elde edilir. Bu değere karşılık gelen  $t_{new}$  değeri okunur.
5. Son olarak, elde edilen değerler denklem (5)'de yerine konularak hidrolik iletkenliğe ulaşılır.

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{Re}{r_w}\right)}{2L_e} \frac{1}{t_{new}} \quad (5)$$



Şekil 4.  $X, Y, Z$  boyutsuz parametrelerinin  $L_e/r_w$  'nun bir fonksiyonu olarak gösterilmesi[4]

### 3.1.2. Dagan Metodu

Dagan [8], Bouwer ve Rice Metodunu temel almıştır ancak Bouwer ve Rice metodundan küçük bir farkı vardır: Dagan metodunda sınır koşulu yoktur, Bouwer-Rice metodunda ise kuyudan belirli bir mesafede sabit yük sınır koşulu olduğu kabul edilir. İşlem adımları;

1. Logaritmik düşey eksene  $H(t)/H_0$  değerleri, aritmetik yatay eksene ise zaman ( $t$ ) değerleri işaretlenir. İşaretlenen noktalara bir düz çizgi uydurulur.
2. Düz çizgi geriye doğru uzatılarak  $y$  eksenini kestiği değer okunur. Bu değer  $H(t)/H_0=0,368$  ile çarpılarak yeni düzeltilmiş  $[H(t)/H_0]_{new}$  değeri elde edilir. Bu değere karşılık gelen  $t_{new}$  değeri okunur.
3. Anizotropik oran  $K_z/K_r$  değerine göre  $\psi$  denklem (6) ile bulunur (Genelde  $K_z/K_r=1$  alınır).

$$\psi = \frac{\sqrt{K_z/K_r}}{L_e/r_w} \quad (6)$$

4. Bulunan  $\psi$  değerini kullanarak basıncısız akiferler için Çizelge 1 veya Çizelge 2'den duruma uygun olan biri kullanılarak boyutsuz akım parametresi,  $P$ , değerine ulaşılır. Basıncılı akiferler için [9]'da ayrı bir çizelge sunulmuştur.

Çizelge 1. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi ( $P$ ) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve  $L_e/D \leq 0,05$  ise) [9]

$\psi$	$(L_w+L_e)/L_e$				
	8	4	2	1,5	1,05
0,2	0,646	0,663	0,705	0,756	1,045
0,1	0,477	0,487	0,505	0,531	0,687
0,067	0,409	0,416	0,429	0,446	0,562
0,050	0,367	0,373	0,385	0,397	0,491
0,033	0,322	0,325	0,335	0,352	0,414
0,025	0,294	0,297	0,305	0,322	0,370
0,020	0,276	0,278	0,287	0,301	0,342
0,013	0,247	0,249	0,255	0,269	0,300
0,010	0,230	0,231	0,238	0,250	0,276
0,0067	0,211	0,210	0,213	0,227	0,248
0,0050	0,198	0,199	0,201	0,213	0,230

Çizelge 2. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi ( $P$ ) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve  $(L_w+L_e)=D$  ise) [9]

$\psi$	$L_e/D$					
	1	0,83	0,67	0,50	0,20	0,10
0,20	1,289	0,723	0,631	0,576	0,510	0,492
0,10	0,800	0,510	0,460	0,428	0,390	0,380
0,050	0,536	0,384	0,354	0,335	0,312	0,306
0,025	0,388	0,305	0,286	0,273	0,258	0,254
0,010	0,279	0,238	0,227	0,219	0,209	0,206

5. Son olarak denklem (7)'den yararlanarak hidrolik iletkenlik elde edilir.



$$K_r = \frac{r_c^2(1/P)}{2L_e t_{new}} \quad (7)$$

### 3.2. Pompalama Testleri

#### 3.2.1. Kademeli Pompalama Testi

Kademeli pompalama testi tek bir kuyuda yapılır. Bu testin amacı farklı debilerde oluşabilecek düşüm miktarını tahmin etmeye yarayan bir debi-düşüm eğrisi elde etmektir. Öncelikle düşük sabit debi ile pompalamaya başlanır. Su seviyesi sabit hale geldiğinde vana açılarak debi artırılır ve pompalama işlemine su seviyesi sabitlenene kadar tekrar devam edilir. Bu süreç en az 3 kademe tekrarlanır. Her kademe yaklaşık olarak eşit süre alır. Bir kademe takribi olarak 30 dakika ile 2 saat arasında değişebilir. Bunu ilk olarak Jacob [10] çalışmıştır. Pompaj kuyusundaki düşüm için aşağıda verilen Jacob eşitliğini geliştirmiştir.

$$s=B(R_e,t)Q+CQ^2 \quad (8)$$

$$B(R_e,t)=B_1(r_c,t)+B_2 [TL^{-2}]$$

$$B_1(r_c,t)=\text{Lineer akifer kaybı katsayısı } [TL^{-2}]$$

$$B_2=\text{Lineer kuyu kaybı katsayısı } [TL^{-2}]$$

$$C=\text{Lineer olmayan kuyu kaybı katsayısı } [T^2L^{-5}]$$

$$R_e=\text{Kuyunun etkin yarıçapı } [L]$$

$$r_c=\text{Kuyunun gerçek yarıçapı } [L]$$

$$t=\text{Pompalama süresi } [T]$$

$$s=\text{Düşüm } [L]$$

Rorabaugh [11], Jacob eşitliğinin (8) aşağıdaki şekilde okunmasını önermiştir. (9)'nolu denkleme Rorabaugh eşitliği denilmektedir.  $P$  değeri 1,5 ile 3,5 arasında bir değerdir [12]. Diğer yandan, Jacob'un önerdiği  $P=2$  değeri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$s=BQ+CQ^P \quad (9)$$

Denklem (8) ve (9)'daki bilinmeyen parametrelerin bulunması için kullanılan Hantush-Bierschenk metodu [13], [14] ve Rorabaugh metodu [11] aşağıda sunulmuştur.

#### 3.2.1.1. Hantush-Bierschenk Metodu

Hantush [13] ve Bierschenk [14] aşağıda belirtilen kabuller altında bu yöntemin uygulanabilmesini önermişlerdir.

1. Akifer basınçlı, sızıntılı veya basınçsız olabilir.
2. Akifer, yatay düzlemde sonsuz genişliğe sahiptir.

3. Akifer, homojen, izotropik ve sabit kalınlıktadır.
4. Pompalamadan önce, piyezometrik yüzey yatay durumdadır.
5. Her kademede pompalanan debi, sabit ve bir önceki kademededen yüksek olmalı.
6. Kuyuya giren su yatay yönde iletilir.
7. Kuyudaki akım kararsız haldedir.
8. Lineer olmayan kuyu kayıpları tahmin edilebilir düzeydedir ve  $CQ^2$  değerine bağlıdır.

Hantush yukarıda bahsedilen Jacob eşitliğine (denklem (8)) süperpozisyon prensibi uygulayarak kademeli pompalama testinin  $n$ . kademesinde kuyudaki düşüm aşağıdaki şekilde ifade etmiştir:

$$s_{w(n)} = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i B(R_e, t - t_i) + CQ_n^2 \quad (10)$$

$s_{w(n)}=t$  zamanında  $n$ . kademedeki toplam düşüm [L]

$R_e$ =Kuyunun etkin yarıçapı [L]

$t_i=i$ . kademe başlangıcındaki zaman [T]

$Q_n=n$ . kademe sırasındaki sabit debi [ $L^3T^{-1}$ ]

$Q_i=i$ . kademe sırasındaki sabit debi [ $L^3T^{-1}$ ]

$\Delta Q_i=Q_i-Q_{i-1}$

Yarı logaritmik bir grafikte yatay logaritmik eksene zaman, düşey eksene ise düşüm değerleri aktarılır. Her kademenin son kısmına oturtulan lineer çizgi bir sonraki kademenin sonuna kadar uzatılır. Her bir kademenin başlangıcından sabit bir zaman aralığı ( $\Delta t$ ) kadar ileride okunan  $\Delta s_{w(i)}$  düşüm değerleri belirlenir. Toplam düşüm, her bir kademede okunan düşümlerin tümü toplanarak denklem (11)'de belirtildiği gibi  $s_{w(n)}=\Delta s_{w(1)}+\Delta s_{w(2)}+\dots+\Delta s_{w(n)}$  şeklinde hesaplanır.

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_{w(i)} = s_{w(n)} = B(R_e, \Delta t)Q_n + CQ_n^2 \quad (11)$$

$\Delta s_{w(i)}=i$ . kademe ile bir önceki kademe arasındaki düşüm [L]

(11) nolu denklemin her tarafı  $Q_n$ 'e bölünürse:

$$\frac{s_{w(n)}}{Q_n} = B(R_e, \Delta t) + CQ_n \quad (12)$$

Aritmetik kağıdın düşey eksenine  $s_{w(n)}/Q_n$  değeri, yatay eksenine ise  $Q_n$  değerleri işaretlenir. Bu noktalardan geçen bir doğru çizilir. Bu doğrunun eğimi  $C$ 'dir. Doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ise  $B$ 'dir. Bulunan  $B$  ve  $C$  değerleri, denklem (8)'de yerine konularak debi-düşüm eğrisi elde edilir.

### 3.2.1.2. Rorabaugh Metodu

Aşağıda belirtilen kabuller altında bu yöntem uygulanır [11];

1. Akifer basınçlı, sızıntılı veya basınçsız olabilir.
2. Akifer, yatay düzlemde sonsuz genişliğe sahiptir.
3. Akifer, homojen, izotropik ve sabit kalınlıktadır.
4. Pompalamadan önce, piyezometrik yüzey yatay durumdadır.
5. Her kademedeki pompalanan debi sabit ve bir önceki kademedeki yüksektir.
6. Kuyuya giren su yatay yönde iletilir.
7. Kuyudaki akım kararsız haldedir.
8. Lineer olmayan kuyu kayıpları tahmin edilebilir düzeydedir ve  $CQ^P$  değerine bağlıdır.

Süperpozisyon prensibi (9) nolu Rorabaugh denklemine uygulandığında toplam düşüm aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_{w(i)} = s_{w(n)} = BQ_n + CQ_n^P \quad (13)$$

Denklem (13)'ün her iki tarafı  $Q_n$ 'e bölündüğünde:

$$\frac{s_{w(n)}}{Q_n} = B + CQ_n^{P-1} \quad (14)$$

Her iki tarafın logaritması alındığında:

$$\log \left( \frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B \right) = \log C + (P - 1) \log Q_n \quad (15)$$

Yarı logaritmik kağıtta yatay logaritmik eksene zaman, düşey aritmetik eksene ise düşüm değerleri aktarılır. Her bir kademedeki düşüm bir önceki metottaki gibi teker teker belirlenir. Toplam düşüm, her bir kademedeki okunan düşümlerin tümü toplanarak  $s_{w(n)} = \Delta s_{w(1)} + \Delta s_{w(2)} + \dots + \Delta s_{w(n)}$  şeklinde hesaplanır. Her kademe için tahmini  $B_i$  değerleri alınır. Her bir kademe için  $(s_{w(n)}/Q_n - B_i)$  değerleri hesaplanır. Tam logaritmik kağıdın düşey eksenine  $(s_{w(n)}/Q_n - B_i)$ , yatay eksenine ise  $Q_n$  değerleri işlenir. Çıkan eğrilerden düz bir çizgiye en yakın olan seçilir. En düz çizgisini veren  $B_i$  değeri,  $B$ 'nin gerçek değeridir. Düz çizginin eğimi bulunur. Bulunan eğim,  $(P-1)$ 'e eşittir.  $Q_n = 1$  eksenine bu düz çizginin kesişim noktası bulunur. Düşey eksenden okunan değer  $C$ 'ye eşittir. Bulunan  $B$ ,  $C$  ve  $P$  değerleri denklem (9)'da yerine konularak debi-düşüm eğrisi elde edilir.

### 3.2.2. Geri Dönüm Testi

Akiferin hidrolik iletkenliğine ulaşabilmek için yapılan bir testtir. Tek bir kuyuda pompaj yapılır. Pompajın durdurulmasından sonra su seviyesi yükselerek pompaj öncesinde ölçülmüş olan statik seviyeye yaklaşır. Yeterli müddet beklendiğinde başlangıçtaki seviyeye geldiği gözlenir. Su seviyesinin yükselimi sırasında, su seviyesi ile başlangıçtaki

su seviyesi arasındaki mesafeye “artık düşüm” adı verilir. Test, sadece basınçlı akiferlerde sabit debi ile pompalanan ve akiferi tamamen delen kuyularda yapılır. Ancak bazı koşullar sağlandığında sızıntılı, basınçsız akiferlerde ve akiferi kısmen delen kuyularda da kullanılabilir [3]. Pompalama deneyleri sonrası kuyuda hesaplanan artık düşüm denklem (16)’da gösterilmiştir [15].

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] \quad (16)$$

$s'$ =Artık düşüm [L]

Theis kuyu fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \dots \quad (17)$$

Denklem (16)’daki  $u$  ve  $u'$  değişkenleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{ve} \quad u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'} \quad (18)$$

Denklem (18)’deki  $u$  ve  $u'$  yeteri kadar küçük olduğunda ( $<0,01$ ), artık düşümün yaklaşık değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln \frac{4Tt}{r^2 S} - \ln \frac{4Tt'}{r^2 S'} \right] \quad (19)$$

$r$ =Pompaj kuyusuyla gözlem kuyusu arasındaki mesafe [L]

$S'$ =Geri dönüş esnasındaki depolama katsayısı [-]

$S$ =Pompalama esnasındaki depolama katsayısı [-]

$t'$ =Pompalamanın durmasından itibaren geçen süre [T]

$Q$ =Sabit kuyu debisi [ $L^3T^{-1}$ ]

$T$ =Transmisivite [ $L^2T^{-1}$ ]

$S$  ve  $S'$  sabit, eşit ve  $T$  sabit ise denklem (19), aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \left( \frac{t}{t'} \right) \quad (20)$$

Düşey eksene  $s'$ , logaritmik yatay eksene  $t/t'$  işaretlenir. Noktalardan geçen düz bir çizgi çekilir. Yatay ekseninde bir logaritmik döngüyü kapsayacak şekilde alınan doğrunun eğimi;

$$\Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \quad (21)$$

şeklinde dir. Denklem (21)’de  $Q$  ve  $\Delta s'$  değerleri yerine konularak  $T$  değerine ulaşılır. Bu değer doygun kalınlığa bölünerek  $K$  bulunur.

### 3.2.3. Değişken Debili Pompaj Testi

Bu test akiferin hidrolik iletkenliğine ulaşmak amacıyla yapılır [16]. Basınçlı akiferler için Theis eşitliği aşağıdaki gibidir [15].

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (22)$$

Denklem (17)'de Theis kuyu fonksiyonundaki  $u$ 'nun küçük değerleri için denklem (22) düzenlendiğinde kuyudaki düşüm aşağıdaki şekilde hesaplanır [17]:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{R_e^2 S} \quad (23)$$

$s$ =Düşüm [L]

$R_e$ =Kuyunun etkin yarıçapı [L]

$t$ =Pompalamanın başladığı andan itibaren geçen zaman [T]

$Q$ =Sabit kuyu debisi [ $L^3T^{-1}$ ]

$T$ =Transmisivite [ $L^2T^{-1}$ ]

$S$ =Depolama katsayısı [-]

$W(u)$ =Theis kuyu fonksiyonu [-]

(23) nolu denkleme kuyu kaybı eklendiğinde:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{R_e^2 S} + CQ^2 \quad (24)$$

Buradaki  $C$  kuyu kaybı katsayısıdır [18]. Denklem (24) aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$s = a(b + \log t)Q + CQ^2 \quad (25)$$

(25) nolu denklemdaki  $a$  ve  $b$  ifadelerine aşağıda yer verilmiştir.

$$a = \frac{2,3}{4\pi T} \quad (26)$$

$$b = \log \frac{2,25T}{R_e^2 S} \quad (27)$$

Değişken debili pompaj testinde, farklı debiler ile ( $Q_1, Q_2, \dots$ ) testler yapılır ve her bir testin sonunda su seviyesinin eski halini alması beklenir. Her bir testte  $t$  anındaki düşümler aşağıdaki gibi yazılır:

$$s_n = a(b + \log t)Q_n + CQ_n^2 \quad (28)$$

(28) nolu denklemin her iki tarafı  $Q_n$  ile bölüldüğünde:

$$s_n/Q_n = a(b + \log t) + CQ_n \quad (29)$$

veya

$$s_n/Q_n = A + CQ_n \quad (30)$$

Bir takım düzenlemeler yapıldığında:

$$A_n - A_{n-i} = a(b + \log t_n) - a(b + \log t_{n-i}) \quad (31)$$

$$= a \log\left(\frac{t_n}{t_{n-i}}\right) \quad (32)$$

$$= \frac{2,3}{4\pi T} \log\left(\frac{t_n}{t_{n-i}}\right) \quad (33)$$

Denklem (33)'den  $T$  çekilir.

$$T = \frac{2,3 \log\left(\frac{t_n}{t_{n-i}}\right)}{4\pi(A_n - A_{n-i})} \quad (34)$$

Aritmetik kağıdın düşey eksenine  $s_n/Q_n$  ve yatay eksenine  $Q_n$  değerleri aktarılır. Bu noktalara bir doğru oturtulur. Her bir  $t$  değeri için bir adet düz çizgi elde edilir. Bu doğruların düşey ekseni kestiği nokta  $A$ , eğimi ise  $C$ 'dir. Birbirine en yakın  $C$  değerleri için  $A$  ve  $t$  çifti seçilir. (34) nolu denklemden transmisivite elde edilir. Bu değer doygun kalınlığa bölünerek  $K$  bulunur. Bu test basınçlı ve basınçsız akiferler için kullanılır. Kuyudaki düşüm  $s$  iken basınçsız akiferlerde bir düzeltme ile denklem (35)'da yer alan düzeltilmiş düşüm elde edilir [19].

$$s^* = s - s^2/2D \quad (35)$$

$s^*$ =Düzeltilmiş düşüm [L]

$D$ =Akiferin pompajdan önceki doygun kalınlığı [L]

Arazide yapılan testler yukarıda verilen analitik metotlar ile çözülüp, elde edilen sonuçlar MODFLOW sonuçları ile karşılaştırmalı olarak aşağıdaki bölümde sunulmuştur.

#### 4. SAYISAL MODELLEME VE UYGULAMA

Arazide yapılmış olan tüm kuyu testlerinin MODFLOW [2] yazılımı ile sayısal modellenmesi yapılmıştır. MODFLOW, U.S. Geological Survey'in modüler üç-boyutlu sonlu farklar yeraltısuyu modeli olup son yıllarda kullanımı giderek artmıştır. MODFLOW, yeraltısuyu akımını yöneten kısmi diferansiyel denklemleri sonlu farklar metoduyla çözen bir programdır.

#### 4.1. Pompalama Testleri

Pompalama testlerinin yapıldığı kuyu için MODFLOW grid ağında 200 sütun, 200 satır mevcut olup toplam 40000 aktif hücre girilmiş olup, akifer basınçsız, derinliği 27 m ve akım kararsız olarak tanımlanmıştır. Modellemede zaman birimi saniye, uzunluk birimi metre, debi birimi ise  $m^3/sn$  olarak alınmıştır. Modellemede 3 farklı durum kullanılmıştır.

**Durum 1:** Öncelikle her bir hücre 1 m x 1 m'lik bir alan temsil etmek üzere modellenmiştir. Akifer çok ince kum-silt malzemeye sahip olduğundan, özgül verim her yerde  $S_y=0,1$  olarak alınmıştır.

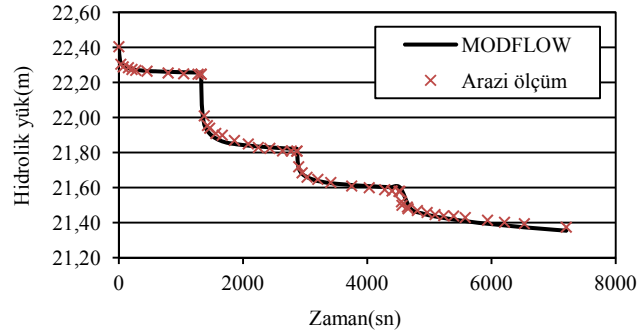
**Durum 2:** Arazide açılan kuyunun yüzey alanına eşit olması için her bir hücrenin alanı 0,117 m x 0,117 m olarak tanımlanmış ve özgül verim her yerde  $S_y=0,1$  olarak alınmıştır.

**Durum 3:** Arazide açılan kuyunun yüzey alanına eşit olması için her bir hücrenin alanı 0,117 m x 0,117 m olarak tanımlanmış ve kuyunun tanımlandığı hücre dışında her yerde özgül verim  $S_y=0,1$  alınmıştır. Kuyuda ise, su çekildiğinde arazideki düşümün birebir aynısını yansıtabilmek amacıyla,  $S_y=1$  alınmıştır.

Kuyuda MODFLOW'un well paketiyle, her bir kademe için çekilen miktar kadar negatif debi değeri tanımlanmıştır. Akifere herhangi bir sınır şartı verilmediğinden MODFLOW, otomatik olarak geçirimsiz sınır şartını kullanır. Sonsuz akifer durumunu temsil etmek için akiferin yatay düzlemde yeterince geniş alınması gerekir. Bu çalışma için modellenen alan durum 1 için 200 m x 200 m, durum 2 ve 3 için 23,4 m x 23,4 m alınmış olup her iki değerinde yeterince büyük olduğu ve su seviyelerinin simülasyon süresi boyunca geçirimsiz sınırlardan etkilenmediği görülmüştür. Ortam homojen olarak düşünülerek tek bir hidrolik iletkenlik bölgesi tanımlanmıştır. MODFLOW'da zamana bağlı girdi verilerinin (pompaj debisi gibi) sabit olduğu süreler stres periyodu denir ve bunlar kullanıcı tarafından belirlenir. Örneğin, bu çalışmada yapılan kademeli pompalama deneyini modellerken dört adet stres periyodu tanımlanmıştır (Şekil 5). Ayrıca, her bir stres periyodunun içindeki zaman basamakları ( $\Delta t$ ), yine kullanıcı tarafından verilen bir çarpan (ör. 1,1) yardımıyla program tarafından küçükten büyüğe doğru artacak şekilde otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bunun amacı, stres periyodunun başlangıcında hidrolik yükteki ani değişimi yakalayabilmektir. Çalışılan kuyuda ölçülen hidrolik yük değerleri gözlem verisi olarak tanımlanmış ve *Parameter Estimation* seçeneği kullanılarak ortamın bilinmeyen hidrolik iletkenlik değeri bulunmaya çalışılmıştır. MODFLOW, simülasyon esnasında hidrolik iletkenlik değerlerini önceden tanımlanmış sınırlar arasında değiştirerek hesaplanan ve gözlemlenen hidrolik yük değerleri arasındaki hatayı (AFKT, ağırlıklı farkların kareleri toplamı) minimize ederek en uygun değeri hesaplamaktadır. Arazide yapılan kademeli pompalama deneyinin sayısal çözümlerine Çizelge 3 ve Şekil 5'de, pompalama deneylerine ise Çizelge 4 ve Şekil 6'da yer verilmiştir. Analitik yöntemle yapılan çözümlere göre hidrolik iletkenlik, değişken debili pompaj testi sonucuna göre  $3,60E-05$  m/sn ve geri dönüş testi sonucuna göre  $1,96E-05$  m/sn bulunmuştur. Bu çalışmada, analitik yöntemler ve MODFLOW birbirinden bağımsız iki farklı yöntem olarak kullanılmıştır. MODFLOW'a kullanıcı tarafından tanımlanmış bir hidrolik iletkenlik değeri ile simülasyon yaptırmak hata oranı daha yüksek bir sonuç vereceğinden analitik yöntemle bulunan sonuçlar kullanılmamıştır.

Çizelge 3. Kademeli pompalama deneyinin 3 farklı durum için MODFLOW sonucu

Deney tarihi	Durum	MODFLOW ile $K(m/sn)$	MODFLOW AFKT
2.11.2012	1	2,52E-05	0,2510
	2	4,22E-05	0,1050
	3	4,20E-05	0,0944

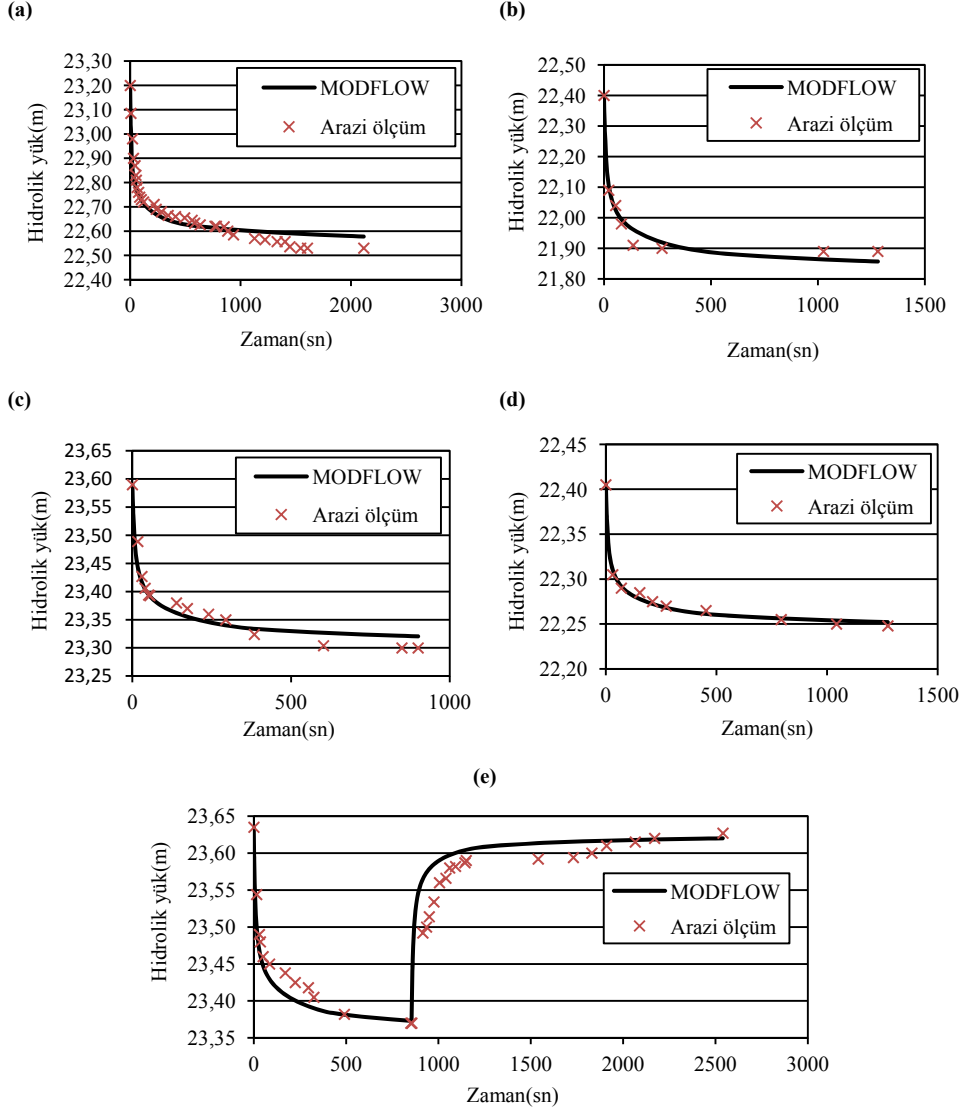


Şekil 5. Kademeli pompalama deneyi ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümünün karşılaştırılması (Kullanılan debiler, lt/sn: 0,17; 0,65; 0,85; 1,01)

Çizelge 4. Pompalama deneylerinin 3 farklı durum için MODFLOW sonuçları

Deney tarihi	Durum	$Q (m^3/sn)$	MODFLOW $K (m/sn)$	MODFLOW AFKT
7.02.2013	1	6,79E-04	2,05E-05	0,88600
	2	6,79E-04	4,07E-05	0,45000
	3	6,79E-04	3,99E-05	0,19000
31.10.2012	1	5,38E-04	1,78E-05	0,55600
	2	5,38E-04	3,72E-05	0,02320
	3	5,38E-04	3,61E-05	0,02150
21.02.2013	1	3,52E-04	2,06E-05	0,11700
	2	3,52E-04	4,61E-05	0,03300
	3	3,52E-04	4,46E-05	0,01750
17.02.2013	1	3,16E-04	2,21E-05	0,10700
	2	3,16E-04	4,33E-05	0,13900
	3	3,16E-04	4,10E-05	0,10300
2.11.2012	1	1,71E-04	2,01E-05	0,02580
	2	1,71E-04	4,13E-05	0,00059
	3	1,71E-04	4,06E-05	0,00054

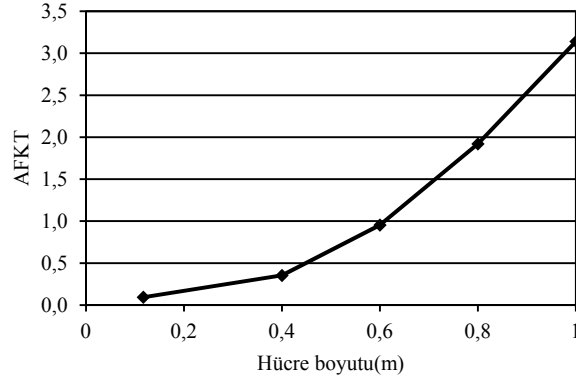




Şekil 6. Pompalama deneyleri ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması (a)7 Şubat 2013 (b)31 Ekim 2012 (c)21 Şubat 2013 (d)2 Kasım 2012 (e)17 Şubat 2013 (geri dönüm testi ile birlikte)

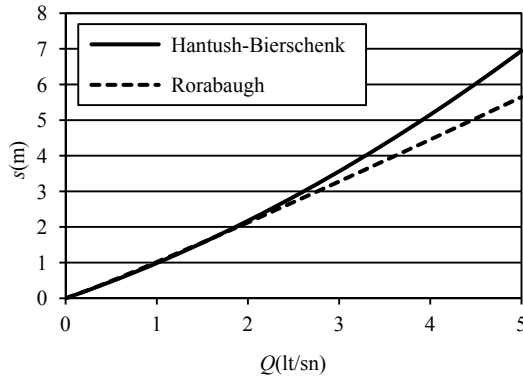
Durum 1'deki hata değerinin diğerlerine göre yüksek oluşunun sebebi ise grid çözünürlüğünden olduğu düşünülmektedir. Bu sebepten, grid çözünürlüğünün sonuçlar üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. En düşük hatayı verdiği için durum 3 temel alınmış ve kademeli pompalama deneyi, farklı hücre boyutları

ile tekrar modellenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi AFKT değeri hücre boyutu ile azalmaktadır. En düşük hücre boyutu olarak 0,117 m x 0,117 m kullanılmasının nedeni, hem arazide açılan kuyunun yüzey alanına eşit olması hem de AFKT değerinin oldukça küçük olmasıdır.



Şekil 7. Hata değerinin hücre boyutuna göre değişimi

Bu kuyuda son olarak, kademeli pompalama testi verileri kullanılarak, Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh analitik yöntemleri ile debi-düşüm eğrileri elde edilmiştir (Şekil 8). Küçük debilerde eğriler çakışmakta ve debi arttıkça bu eğriler birbirinden uzaklaşmaktadır. Arazi uygulamasında kullanılan en yüksek debinin yaklaşık 1 lt/sn olduğu düşünülürse kullanılan bu iki metodun 2 lt/sn'ye kadar benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Daha yüksek debilerde ise ancak tahmini olarak sonuçlar elde edilmiştir.



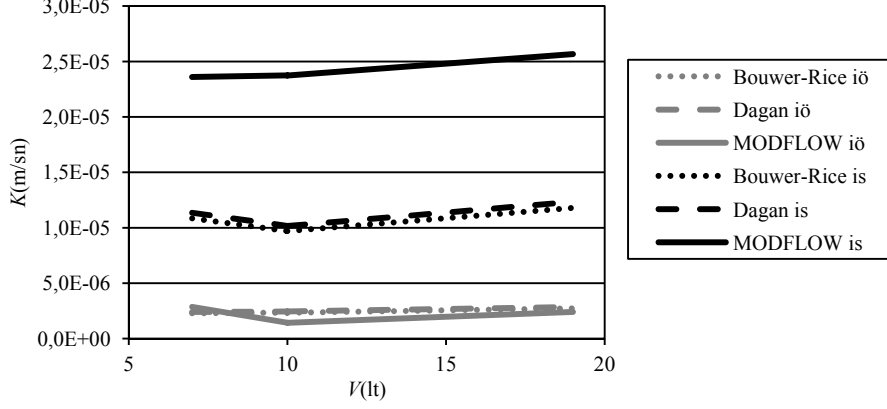
Şekil 8. Kademeli pompalama testi sonucu elde edilen debi-düşüm grafiği

#### 4.2. Slug Testler

Slug testlerin yapıldığı kuyu için MODFLOW çözüm ağında 200 sütun, 200 satır olmak üzere toplam 40000 aktif hücre oluşturulmuştur. Slug testlerde de yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı durum 3 ile modelleme yapılmıştır. Akifer basınçsız, derinliği 20 m ve akım kararsız olarak tanımlanmıştır. Kuyuya su kütesinin ani bırakılmasını temsil edebilmek için MODFLOW'un well paketi kullanılmış ve pozitif debi değeri tanımlanıp kuyuya çok kısa bir süre içinde su basılıyormuş gibi modellenmiştir. Dolayısıyla slug testlerde iki adet stres periyodu tanımlanmıştır. Bu çalışma için modellenen alanın (23,4 m x 23,4 m) yeterince büyük olduğu ve su seviyelerinin simülasyon süresi boyunca geçirimsiz sınırlardan etkilenmediği görülmüştür. Ortam homojen olarak düşünülerek tek bir hidrolik iletkenlik bölgesi tanımlanmıştır. Pompalama deneylerinde olduğu gibi *Parameter Estimation* seçeneği kullanılarak ortamın bilinmeyen hidrolik iletkenlik değeri bulunmaya çalışılmıştır. Çizelge 5'de MODFLOW ile ve analitik yöntemlerle bulunan hidrolik iletkenlik değerlerine yer verilmiştir. Çizelge 5'de verilen inkişaf öncesi ve sonrası analitik ve MODFLOW çözümlerinin aritmetik ortalamaları alınmış ve sonuçlar Şekil 9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5. Slug testler için analitik çözüm ve MODFLOW sonuçları

Deney tarihi	İnkişaf durumu	Bırakılan su hacmi (lt)	Bouwer-Rice $K(m/sn)$	Dagan $K(m/sn)$	MODFLOW $K(m/sn)$
30.01.2013	Yapılmadı	7	2,27E-06	2,38E-06	2,77E-06
30.01.2013	Yapılmadı	7	2,22E-06	2,33E-06	3,44E-06
30.01.2013	Yapılmadı	7	2,38E-06	2,49E-06	2,38E-06
15.01.2013	Yapılmadı	10	2,28E-06	2,38E-06	1,09E-06
15.01.2013	Yapılmadı	10	2,18E-06	2,28E-06	1,34E-06
30.01.2013	Yapılmadı	10	2,56E-06	2,69E-06	1,85E-06
17.01.2013	Yapılmadı	19	1,82E-06	1,90E-06	1,94E-06
17.01.2013	Yapılmadı	19	2,78E-06	2,91E-06	2,08E-06
17.01.2013	Yapılmadı	19	3,56E-06	3,74E-06	3,22E-06
17.02.2013	Yapıldı	7	9,52E-06	9,97E-06	2,29E-05
17.02.2013	Yapıldı	7	1,25E-05	1,31E-05	2,25E-05
17.02.2013	Yapıldı	7	1,05E-05	1,10E-05	2,54E-05
17.02.2013	Yapıldı	10	9,61E-06	1,01E-05	2,08E-05
17.02.2013	Yapıldı	10	9,70E-06	1,02E-05	2,11E-05
17.02.2013	Yapıldı	10	9,80E-06	1,03E-05	2,93E-05
17.02.2013	Yapıldı	19	1,18E-05	1,23E-05	2,05E-05
17.02.2013	Yapıldı	19	1,11E-05	1,16E-05	2,38E-05
17.02.2013	Yapıldı	19	1,25E-05	1,31E-05	3,27E-05



Şekil 9. İnkişaf öncesi ve sonrası 7, 10 ve 19 lt için analitik ve MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması (i.ö.:inkişaf öncesi, i.s.:inkişaf sonrası)

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki farklı kuyuda yapılan testlerden elde edilen zamana bağlı hidrolik yük verilerine uygulanan analitik ve sayısal yöntemler ile bu kuyuların civarındaki hidrolik iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Analitik ve sayısal yöntemlere göre hesaplanan hidrolik iletkenlik değerlerinin ortalamaları Çizelge 6'da özet olarak sunulmuştur. İdeal ortamlar için geliştirilmiş analitik yöntemler ile elde edilen akifer hidrolik iletkenliğinin, kuyunun derinliği, filtreli kısmın uzunluğu gibi kuyunun yapısıyla ilgili durumların yanı sıra kullanılan analitik metoda göre de aynı kuyu için birebir aynı sonuçları vermediği görülmüştür.

Çizelge 6. Analitik ve sayısal yöntemlerle bulunan hidrolik iletkenlik değerleri (Aynı yöntemle birden fazla elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır)

Kuyu	Testin adı	Analitik yöntem K(m/sn)		Sayısal yöntem K(m/sn)(durum 3)
		Bouwer-Rice metodu	Dagan metodu	
2	Slug test inkişaf öncesi	2,45E-06	2,56E-06	2,23E-06
	Slug test inkişaf sonrası	1,08E-05	1,13E-05	2,43E-05
1	Geri dönüş testi	1,96E-05		4,10E-05
1	Değişken debili pompaj testi	3,60E-05		4,04E-05
1	Kademeli pompalama testi	-		4,20E-05

Çizelge 3 ve Çizelge 4’de görüldüğü gibi tüm pompalama deneylerinde durum 2 ve durum 3’e göre yapılan modellemelerde bulunan hidrolik iletkenlikler birbirine oldukça yakındır. Bununla birlikte durum 3’ün nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunun sebebi, kuyunun bulunduğu hücrede özgül verimin 1 alınmış olması ve dolayısıyla gerçeği daha iyi yansıtmış olmasıdır. Ayrıca, pompaj debisinin hidrolik iletkenlik değerlerini etkilemediği görülmüştür. Bu sebepten düşük debilerle yapılan testlerde bile hidrolik iletkenliğin gerçekçi bir biçimde bulunabileceği anlaşılmıştır. Grid çözünürlüğünün etkisini araştırmak amacıyla yapılan çalışma sonucuna göre hücre boyutu azaldıkça hata oranı da azalmaktadır (Şekil 7). Özellikle bu tarz lokal çalışmalarda sayısal model oluşturulurken grid çözünürlüğünün etkisi mutlaka araştırılmalıdır. Kurulan sayısal model arazi durumunu ne kadar iyi yansıtırsa elde edilen sonuçlar o kadar gerçekçi olacaktır. Bu çalışmada, simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile arazide alınan ölçüm değerleri arasındaki farklar düşük olduğundan, oluşturulan sayısal modelin arazideki durumu başarılı bir biçimde temsil ettiği düşünülmektedir. Pompaj testlerinin yapıldığı kuyuda son olarak, kademeli pompalama testinin verileri kullanılarak, Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh analitik yöntemleri ile debi-düşüm eğrileri elde edilmiştir (Şekil 8). Bu tür eğriler, testin yapıldığı kuyuda yüksek kapasiteli bir pompa kullanıldığında düşümün ne kadar olabileceği hakkında fikir vermektedir.

Slug testlerin sonuçlarına bakıldığında gerek Bouwer-Rice ve Dagan analitik yöntemlerine göre gerekse MODFLOW tarafından bulunan sonuçlara göre inkişaf sonrasında kuyu civarı hidrolik iletkenliğinin önemli ölçüde artış gösterdiği ve buna ek olarak testlerde kullanılan hacmin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Sonuçlar arası farklılıklar ideal test koşullarının arazi uygulamalarında birebir sağlanamayışından meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, kuyu açıldıktan hemen sonra uygulanan inkişaf işleminin, kuyuyu, çakıl zarfını ve kuyu civarı akiferi, killi ve kumlu malzemeden arındırdığı, organik ve inorganik maddeleri temizlediği ve dolayısıyla kuyu verimini arttırdığı göz önüne alındığında, bu işlemin pratikte mümkün olduğunca uygulanması önemlidir. Bu sayede özellikle sanayide daha az kuyu ile gereken talep sağlanır, kuyuların ve pompaların ömrü uzar, kuyudan çekilen suyun kalitesi artar ve arıtma maliyeti azalır. Tüm bu sebeplerden dolayı ekonomik getiri sağlanır.

#### Semboller

$B_1(r_c, t)$	Lineer akifer kaybı katsayısı
$B_2$	Lineer kuyu kaybı katsayısı
$C$	Lineer olmayan kuyu kaybı katsayısı
$D$	Akiferin doymun kalınlığı
$H_0$	Su bırakıldıktan hemen sonraki yükselme miktarı
$H(t)$	Zamana bağlı düşüm
$K$	Hidrolik iletkenlik
$L_e$	Kuyuda suyun girdiği filtrenin uzunluğu (filtreli kısmın uzunluğu)
$L_w$	Su tablasından kuyu tabanına olan mesafe
$P$	Boyutsuz parametre

$Q$	Sabit kuyu debisi
$Q_i$	$i$ .kademe sırasındaki sabit debi
$Q_n$	$n$ .kademe sırasındaki sabit debi
$R_e$	Kuyunun etkin yarıçapı
$r$	Pompaj kuyusuyla gözlem kuyusu arasındaki mesafe
$r_c$	Filtresiz borunun yarıçapı
$r_w$	Sondaj yarıçapı (çakıl zarfının yarıçapı)
$S$	Pompalama esnasındaki depolama katsayısı
$S'$	Geri dönüş esnasındaki depolama katsayısı
$S_Y$	Özgül verim
$s$	Düşüm
$s^*$	Düzeltilmiş düşüm
$s'$	Artık düşüm
$s_{w(n)}$	$t$ zamanında $n$ . kademedeki toplam düşüm
$T$	Transmisivite
$t$	Zaman
$t_i$	$i$ . kademe başlangıcındaki zaman
$t_{new}$	Düzeltilmiş zaman
$t'$	Pompalamanın durmasından itibaren geçen süre
$V$	Bırakılan veya çekilen suyun hacmi
$W(u)$	Theis kuyu fonksiyonu
$X$	Boyutsuz parametre
$Y$	Boyutsuz parametre
$Z$	Boyutsuz parametre
$\Delta s_{w(i)}$	$i$ . kademe ile bir önceki kademe arasındaki düşüm
$\psi$	Dagan metodunda kullanılan boyutsuz bir parametre

#### **Kaynaklar**

- [1] Mays, L.W. 2011. Ground and Surface Water Hydrology. Wiley, 617 p.
- [2] McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 586 p.
- [3] Kruseman, G.P., de Ridder N.A. 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. (2nd ed.), Publication 47, Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 370 p.

- [4] Eryılmaz, G. Kuyu Testlerine Dayalı Analitik ve Sayısal Yöntemlerle Akifer Hidrolik İletkenliğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2013.
- [5] Bouwer, H., Rice R.C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v. 12, no. 3, pp. 423-428.
- [6] Bouwer, H. 1989. Estimating and enhancing groundwater recharge. In:Sharma ML (ed) *Groundwater Recharge*. Balkema, Rotterdam, pp 1–10.
- [7] Zlotnik, V. 1994. Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers. *Ground Water*, v. 32, no. 5, pp. 761-766.
- [8] Dagan, G. 1978. A note on packer, slug, and recovery tests in unconfined aquifers, *Water Resources Research*, v. 14, no. 5. pp. 929-934.
- [9] Butler, J.J., Jr. 1998. *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. Lewis Publishers, New York, 252 p.
- [10] Jacob, C.E. 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions ASCE*, v. 112, pp. 1047-1070.
- [11] Rorabaugh, M.I. 1953. Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian wells. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Hyd. Div.* v.19, no 1, pp. 362.1-362.23.
- [12] Lennox, D.H. 1966. Analysis and application of step-drawdown tests. *Journal of Hydraulics Div., ASCE.*, v. 92, no. HY 6, pp.25-47.
- [13] Hantush, M.S. 1964. Hydraulics of wells, in: *Advances in Hydrosience*, V.T. Chow (editor), Academic Press, New York, pp. 281-442.
- [14] Bierschenk, W. H. 1963. Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 64, 493-507.
- [15] 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. *Am. Geophys. Union Trans.*, v. 16, pp. 519-524.
- [16] Nahm, G.Y. 1980. Estimating transmissivity and well loss constant using multirate test data from a pumped well. *Ground Water*, v. 18, no. 3, 281-285.
- [17] Cooper, H.H., Jacob, C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am.Geophys. Union Trans.* v. 27, pp. 526-534.
- [18] Jacob, C.E. 1946. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Proc.Am.Soc.Civil Engrs.* v.79, no.5.
- [19] Jacob, C.E. 1944. Notes on determining permeability by pumping tests under water table conditions: U.S. Geol. Survey open-file rept.

