

**KUYU TESTLERİNE DAYALI ANALİTİK VE
SAYISAL YÖNTEMLERLE AKİFER HİDROLİK
İLETKENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

GÖKÇEN ERYILMAZ



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUYU TESTLERİNE DAYALI ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE
AKİFER HİDROLİK İLETKENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

İnşaat Müh. GÖKÇEN ERYILMAZ

Yrd. Doç. Dr. Serdar KORKMAZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2013

TEZ ONAYI

Gökçen ERYILMAZ tarafından hazırlanan “Kuyu Testlerine Dayalı Analitik ve Sayısal Yöntemlerle Akifer Hidrolik İletkenliğinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr.Serdar KORKMAZ

Başkan : Prof.Dr.Ali Osman Demir İmza
Uludağ Üniversitesi
Ziraat Fakültesi
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof.Dr.Adem Doğangün İmza
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd.Doç.Dr.Serdar Korkmaz İmza
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü

.../.../...

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11/07/2013
Gökçen ERYILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KUYU TESTLERİNE DAYALI ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE AKİFER HİDROLİK İLETKENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Gökçen ERYILMAZ

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç. Dr. Serdar KORKMAZ

Son yıllarda büyük gelişmeler gösteren yeraltısuyu kaynaklarını değerlendirme programlarında, akiferlerin hidrolik karakteristiklerinin bilinmesi önem kazanmaktadır. Akifer parametrelerinin belirlenmesi ile o akiferin ne kadarlık bir ihtiyacı, ne kadar süre boyunca karşılayabileceği tespit edilebilir. Pompaj yapılacak yerin jeolojik yapısı, açılan kuyulardan ne kadar verim alınacağından önceden tahmin edilebilmesi, yeraltı suyu planlaması bakımından önemlidir. Bu çalışmada, kuyu testleri ile akiferin hidrolik iletkenliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Neojen Mühendislik tarafından Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız bir akiferde iki adet kuyu açılmıştır. Açılan iki kuyu arasında yaklaşık 33 metre mesafe bulunmaktadır. Kuyularda yapılan deneyler sonucu elde edilen verilere, analitik yöntemler ve sayısal modellemeler uygulanarak akifer parametrelerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Açılan kuyulardan birinde, 7, 10 ve 19 lt olmak üzere 3 farklı hacmin her biri ile inkişaf öncesi 3 ve inkişaf sonrası 3 defa olmak üzere toplamda 18 adet slug test yapılmıştır. Analitik yöntem olarak Bouwer-Rice ve Dagan metotları, sayısal modelleme için de MODFLOW kullanılmıştır. Kuyuyu temizlemek amacıyla yapılan inkişaf işleminin, kuyu civarı hidrolik iletkenliğe etkisi incelenmiş ve kuyu performansı üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Diğer kuyuda ise pompalama testleri yapılmıştır. Kademeli pompalama test verileri kullanılarak, Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh metotları uygulanmış ve farklı debi değerleri için düşü tahmini yapılmıştır. Bunlara ek olarak, geri dönüş testi (recovery test) ve çoklu pompaj testi (multirate test) ile hidrolik iletkenlik belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca pompalama testlerinin herbiri, MODFLOW programıyla modellenmiş, grid çözünürlüğüne ve özgül verime dayalı farklı durumlar için simülasyonlar yapılmıştır. Gerçek akiferi en iyi temsil eden durum belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik iletkenlik, slug test, geri dönüş testi, çoklu pompaj testi, kademeli pompalama testi, MODFLOW

ABSTRACT
MSc Thesis

**DETERMINATION OF AQUIFER HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING
ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS BASED ON WELL TESTS**

Gökçen ERYILMAZ

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Asst.Prof.Dr. Serdar KORKMAZ

In recently improving groundwater evaluation programs, information on hydraulic characteristics of aquifers has become important. It is possible to predict the amount of available water and the period during which it can be supplied through identification of aquifer parameters. Geological formation of the pumping area, prediction of the efficiency of drilled wells are important for groundwater planning. This study aims to determine the hydraulic conductivity of aquifers by using well tests. Two wells, which are 33 meters away from each other, were drilled in an unconfined aquifer in Bursa Küçük Sanayi region by Neojen Mühendislik. Aquifer parameters were computed by applying analytical methods and numerical modeling to the data obtained from well tests. In one of the wells, slug tests were performed using volumes of 7, 10, and 19 l, with each volume 3 tests were performed before and 3 tests after well development which make a total of 18 tests. Bouwer-Rice and Dagan methods were used as analytical methods and MODFLOW was used for numerical modeling. Effect of well development on near-well hydraulic conductivity and the well performance were investigated. In the other well, pumping tests were applied. Hantush-Bierschenk and Rorabaugh methods were applied to the data from step-drawdown tests and head predictions against varying discharges were made. In addition to these, recovery test and multirate test were used to determine the hydraulic conductivity. Each of the pumping tests were also modelled using MODFLOW program, simulations were made for various cases related to grid resolution and specific yield. The best case that represent the actual aquifer was tried to be determined.

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

TEŐEKKÖR

Bilgi ve tecrübeleri ile her zaman her konuda yanımda olan bana destek veren, çalışmamda deneyimlerini benden esirgemeyen, değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Serdar KORKMAZ' a Őükranlarımı sunarım.

Bu tezde, arazi çalışmamda bana yardımcı olan NEOJEN MÜHENDİSLİK'e ve başta Ersel Özkan olmak üzere tüm çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan bana desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gökçen ERYILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. AKİFERLER ve AKİFER PARAMETRELERİ	3
2.1. Basıncsız Akiferlerde Yöneten Denklemler.....	7
2.2. Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	9
3. AKİFER TESTLERİNDE KULLANILAN ANALİTİK METOTLAR.....	10
3.1. Slug Test	10
3.1.1. Bouwer ve Rice metodu	12
3.1.2. Dagan metodu	16
3.2. Pompalama Testleri.....	18
3.2.1. Kademeli pompalama testleri.....	19
3.2.1.1. Hantush-Bierschenk metodu	20
3.2.1.2. Rorabaugh metodu	22
3.2.2. Geri dönüş testi	24
3.2.3. Çoklu pompaj testi	26
4. ARAZİ ÇALIŞMASI.....	28
4.1. Analitik Metotların Uygulanması	42
4.1.1. Slug testler.....	42
4.1.2. Kademeli pompalama testi.....	45
4.1.2.1. Hantush-Bierschenk metodu	45
4.1.2.2. Rorabaugh metodu	47
4.1.3. Geri dönüş testi	50
4.1.4. Çoklu pompaj testi	51
4.2. Sayısal Modelleme	54
4.2.1. Slug testler için sayısal çözüm	54
4.2.2. Pompalama testleri ve kademeli pompalama testi için sayısal çözüm.....	56
5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	63

KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
a	Çoklu pompaj testinde geçen bir parametre[L]
$B_1(r_c, t)$	Lineer akifer kaybı katsayısı[TL^{-2}]
B_2	Lineer kuyu kaybı katsayısı[TL^{-2}]
b	Çoklu pompaj testinde geçen bir parametre[T^{-1}]
C	Non-lineer kuyu kaybı katsayısı[T^2L^{-5}]
c	Boyutsuz katsayı[-]
D	Akiferin doygun kalınlığı[L]
d	Ortalama boşluk çapı[L]
H_0	Su bırakıldıktan hemen sonraki düşü[L]
$H(t)$	Zamana bağlı düşü[L]
h	Piyeometrik yük[L]
I	Eğim[-]
K	Hidrolik iletkenlik katsayısı[LT^{-1}]
K_r	Radyal hidrolik iletkenlik[LT^{-1}]
K_x	Ana akiferin x yönündeki hidrolik iletkenliği[LT^{-1}]
K_y	Ana akiferin y yönündeki hidrolik iletkenliği[LT^{-1}]
K_z	z yönündeki hidrolik iletkenlik[LT^{-1}]
k	Özgün permeabilite[L^2]
L_e	Kuyuda suyun girdiği filtrenin uzunluğu (filtreli kısmın uzunluğu)[L]
L_w	Su tablasından kuyu tabanına olan mesafe[L]
N	Doğal beslenmenin dağıtılmış oranı[LT^{-1}]
n	Porozite[-]
P	Boyutsuz parametre[-]
P^*	Pompajın dağıtılmış oranı[LT^{-1}]
p	Basınç[$ML^{-1}T^{-2}$]

Q	Sabit kuyu debisi[L^3T^{-1}]
Q_i	i .kademe sırasındaki sabit debi[L^3T^{-1}]
Q_n	n .kademesi sırasındaki sabit debi[L^3T^{-1}]
q	Spesifik akım[LT^{-1}]
q_n	n yönündeki spesifik akım[LT^{-1}]
R	Yapay beslenmenin dağıtılmış oranı[LT^{-1}]
R_e	Yük değişiminin dağıldığı etkili mesafe(Etki yarıçapı)[L]
r	Pompaj kuyusuyla gözlem kuyusu arasındaki mesafe[L]
r_c	Kapalı (filtresiz) borunun yarıçapı[L]
r_w	Sondaj yarıçapı (çakıl zarfının yarıçapı)[L]
S	Pompalama esnasındaki depolama katsayısı[-]
S_Y	Özgül verim[-]
S'	Geri dönüş esnasındaki depolama katsayısı[-]
s	Kuyudaki düşü[L]
s^*	Düzeltilmiş düşü[L]
s'	Artık düşü[L]
$s_{w(n)}$	t zamanında n . kademesi boyunca kuyudaki toplam alçalma[L]
T	Geçirgenlik[L^2T^{-1}]
t	Zaman(Pompajın başlamasından itibaren geçen süre)[T]
t'	Pompalamanın durmasından itibaren geçen süre[T]
t_i	i . kademe başlangıcındaki zaman[T]
t_{new}	Düzeltilmiş zaman[T]
u	Geri dönüş testinde geçen bir parametre[-]
u'	Geri dönüş testinde geçen bir parametre[-]
V	Bırakılan veya çekilen suyun hacmi[L^3]

V_g	Yeraltı suyunun gerçek hızı [LT^{-1}]
$W(u)$	Theis kuyu fonksiyonu[-]
X	Boyutsuz parametre[-]
Y	Boyutsuz parametre[-]
Z	Boyutsuz parametre[-]
z	Seçilen referans noktasına olan düşey mesafe[L]
ΔA	Birim yatay alan[L ²]
$\Delta s_{w(i)}$	i . kademe ile bunu izleyen kademe arasındaki düşü[L]
$\Delta s'$	Yatay ekseninde bir logaritmik döngüyü kapsayacak şekilde alınan doğrunun eğimi[L]
Δh	İki nokta arasındaki piyezometrik yük farkı[L]
ΔL	İki nokta arasındaki mesafe[L]
ΔV_w	Depolanmadan çıkan veya giren suyun hacmi[L ³]
ψ	Dagan metodunda geçen bir parametre[-]
γ	Akışkanın özgül ağırlığı[$MT^{-2}L^{-2}$]
μ	Dinamik viskozite[$ML^{-1}T^{-1}$]
η	Ana akiferin taban yüksekliği[L]

Kısaltmalar Açıklamalar

AFKT	Ağırlıklı Farkların Kareleri Toplamı
KGS	Kansas Geological Survey
L	Uzunluk
M	Kütle
MODFLOW	U.S.Geological Survey Modüler Sonlu Farklar Akım Modeli
T	Zaman

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yeraltı suyu akım kesiti	8
Şekil 3.1. Basınçsız akiferde kuyuya aniden su bırakılmasıyla oluşan durum	12
Şekil 3.2. X, Y, Z boyutsuz parametrelerinin L_e/r_w 'nun bir fonksiyonu olarak gösterilmesi (Bouwer ve Rice 1976)	16
Şekil 4.1. Arazide açılan kuyular	29
Şekil 4.2. Sondaj makinesi	30
Şekil 4.3. Sondaj suyu çukuru, su yolu	31
Şekil 4.4. 250 mm çapındaki matkap	31
Şekil 4.5. Tij	32
Şekil 4.6. Sondaj esnasında alınan numune örnekleri	33
Şekil 4.7. Kapalı boru (filtresiz), filtreli boru	33
Şekil 4.8. En derine indirilen başlıklı boru	34
Şekil 4.9. Bir numaralı dere çakılı	35
Şekil 4.10. Kuyu etrafındaki çakılların dizilimi; (a) İnkişaf öncesi (b) İnkişaf sonrası	36
Şekil 4.11. Kolon boruları (çapı 63,5 mm)	37
Şekil 4.12. Hava boruları (çapı 32 mm)	37
Şekil 4.13. Kompresör	38
Şekil 4.14. (a) Kolon borusunun ve hava borusunun kuyuya girişi (b) Çıkan çamurlu suyun dışarı verilmesi	39
Şekil 4.15. İnkişaf sırasında; (a) Vana açık durum (b) Vana kapalı durum	40
Şekil 4.16. İnkişaf sırasında vana kapalı durumda iken sondaj borusundan basınçlı su çıkışı	41
Şekil 4.17. Seviye metre	42
Şekil 4.18. Slug testlerin analitik çözümü	43
Şekil 4.19. Kademeli pompalama testi analitik çözümü	46
Şekil 4.20. Hantush-Bierschenk metodu	47
Şekil 4.21. Rorabaugh metodu	49
Şekil 4.22. 1. kuyu için debi-düşü grafiği	49
Şekil 4.23. Geri dönüş testi	51
Şekil 4.24. Çoklu pompaj testi	53
Şekil 4.25. İnkişaf öncesi ve sonrası 7, 10 ve 19 lt için analitik ve MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması (i.ö.: inkişaf öncesi, i.s.: inkişaf sonrası)	56
Şekil 4.26. 2 Kasım 2012 kademeli pompalama deneyi ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümünün karşılaştırılması	60

Şekil 4.27. Pompalama deneyleri ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması (a)7 Şubat 2013 (b)31 Ekim 2012 (c)21 Şubat 2013 (d)17 Şubat 2013 (geri dönüm testi ile birlikte) (e)2 Kasım 201262

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Değişik zemin türlerine göre hidrolik iletkenlik değerleri (Bear 1972)	5
Çizelge 3.1. Basınçsız akiferlerde slug testte karşılaşılabilecek durumlar	11
Çizelge 3.2. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve $L_e/D \leq 0,05$ ise) Butler (1998).....	17
Çizelge 3.3. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve $(L_w+L_e)=D$ ise) Butler (1998).....	17
Çizelge 3.4. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Basıncılı formasyonlar için)($L_e/D \leq 0,05$ ise) Butler (1998)	18
Çizelge 4.1. Herbir hacim için inkişaf öncesi ve sonrası analitik çözüm sonuçları.....	44
Çizelge 4.2. Kademeli pompalama testi verileri	45
Çizelge 4.3. Kademeli pompalama testi.....	46
Çizelge 4.4. Rorabaugh metodu	48
Çizelge 4.5. 17 Şubat 2013 tarihli geri dönüş testi verileri	50
Çizelge 4.6. Arazi pompalama deneyleri verileri.....	52
Çizelge 4.7. Çoklu pompaj testi için herbir t zamanındaki s_n^*/Q_n 'e karşılık Q_n değerleri.....	53
Çizelge 4.8. Herbir hacim için inkişaf öncesi ve sonrası MODFLOW sonuçları.....	55
Çizelge 4.9. Kademeli pompalama deneyinin 3 farklı durum için MODFLOW sonucu.....	57
Çizelge 4.10. Pompalama deneylerinin 3 farklı durum için MODFLOW sonuçları	58
Çizelge 4.10. Pompalama deneylerinin 3 farklı durum için MODFLOW sonuçları (devam).....	59
Çizelge 5.1. Kuyu testlerine dayalı analitik ve sayısal yöntemlerle bulunan hidrolik iletkenlik değerleri.....	63

1. GİRİŞ

Temel ve vazgeçilmez bir ihtiyaç olan su, günümüzde içme-kullanma, 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 görünmez bir kaynak olan yeraltı sularına ayrı bir bilinçle yaklaşıp, değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Son yıllarda büyük gelişmeler gösteren yeraltı suyu 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. Akifer parametrelerinin elde edilmesi yeraltı suyu mühendisliğine hız kazandırmak anlamında önem arz etmektedir.

Akifere ait önemli parametrelerden biri olan hidrolik iletkenliğe ulaşmak için literatürde birtakım çalışmalar mevcuttur. Thiem (1906), basınçlı akiferlerde, dairesel, kararlı akım halinde hidrolik iletkenliğe ulaşabilmeyi amaçlamıştır. Theis (1935), basınçlı akiferlerde, dairesel, kararsız akım halini çalışmıştır ve basınçlı, basınçsız akiferlerde hidrolik iletkenliğe ulaşabilmek için geri dönüş testini (recovery test) geliştirmiştir. Cooper ve Jacob (1946), basınçlı, dairesel, kararsız akım hali için Theis formülünü temel alarak hidrolik iletkenliğe ulaşabilmek için Jacob metodunu geliştirmişlerdir. Neuman (1972) basınçsız akiferlerde, dairesel, kararsız akım halinde hidrolik iletkenliğe ulaşmıştır. Basınçsız akiferde, kararlı, dairesel akım halinde hidrolik iletkenliğe ulaşabilmek için Thiem-Dupuit metodu mevcuttur (Dupuit 1863). Nahm (1980) pompaj kuyusunda her testte geri dönüş periyodunun tamamlanmasını bekleyerek farklı debilerle pompalama testleri yapmıştır. Herbir testte aynı t anına kadar bekleyip düşümler ölçmüştür ve birtakım analitik hesaplamalar ile hidrolik iletkenliğe ulaşmıştır.

Hidrolik iletkenliğe ulaşabilmek için aynı zamanda slug testler de yapılmaktadır. Slug testlerde diğer metotlardan farklı olarak pompaj yapılmamaktadır. Slug testler, kuyuya belli bir hacimdeki külçenin aniden bırakılması veya önceden bırakılmış bir külçenin aniden çekilmesi ile su seviyesindeki değişimin zamana bağlı ölçülmesi şeklinde uygulanır. Birtakım analitik hesaplamalar ile akiferin hidrolik iletkenlik değerine ulaşılır. Basıncı akiferlerde Cooper, Bredehoeft ve Papadopulos (Papadopulos, Bredehoeft ve Cooper 1973) metodu ve Hvorslev metodu (1951), basınçsız akiferlerde ise Bouwer-Rice metodu (1976) ve Dagan metodu (1978) bulunmaktadır.

Kuyu performans testleri olarak bilinen kademeli pompalama testleri genel anlamda kuyu kaybı parametrelerinin bulunmasını amaçlamaktadır. Hantush-Bierschenk metodu (Hantush 1964, Bierschenk 1963) basınçlı, sızıntılı, basınçsız akiferlerde uygulanır. Eden-Hazel metodu (1973) ile basınçlı akiferlerde kuyu kaybı parametreleri bulunur ve ayrıca geçirgenlik değerine ulaşılır. Rorabaugh (1953) ve Sheahan (1971) metotları ise basınçlı, sızıntılı ve basınçsız akiferlerde uygulanır.

Bu çalışma, yeraltısuyu akım dinamiğini temsil eden akifer parametrelerinden biri olan hidrolik iletkenliğin, basınçsız akiferlerde bulunması amacını taşımaktadır. Kuyu testlerini yapabilmek amacıyla, Neojen Mühendislik tarafından Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız akiferde iki adet kuyu açılmıştır. Açılan iki kuyu arasında yaklaşık 33 metre mesafe bulunmaktadır. 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 (Mays 2011), sayısal yöntem olarak da MODFLOW (McDonald ve Harbaugh 1988) kullanılarak 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 pompalama testleri yapılmıştır. Kademeli pompalama test verileri kullanılarak, Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh metotları uygulanmış ve farklı debi değerleri için düşü tahmini yapılmıştır. Geri dönüş testi ve çoklu pompaj testi ile hidrolik iletkenlik belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca pompalama testlerinin herbiri,

MODFLOW programıyla modellenmiş, grid çözünürlüğüne ve özgül verime dayalı farklı durumlar için simülasyonlar yapılmıştır. Gerçek akiferi en iyi temsil eden durum belirlenmeye çalışılmıştır.

2. AKİFERLER ve AKİFER PARAMETRELERİ

Yeraltı suyu, yer kabuğunun yapısını teşkil eden ve geçirgen özellikteki jeolojik formasyonlar içerisinde bulunur. Yeraltı suyu taşıyan bu tabakalara akifer denir. Akifer su anlamına gelen "Aqua" ve taşıyan anlamına gelen "Ferre" kelimelerinin birleşmesinden meydana gelir. Akiferler, alt ve üst kısımlar geçirgen veya geçirimsiz tabakalardan oluşan ve yeraltı sularını taşıyan tabakalardır. Akiferler bu tabakaların durumuna göre isim alırlar. En çok bilinen ve üzerinde çalışma yapılan üç çeşit akifer tipi vardır. Alt ve üst kısımları tamamen geçirimsiz tabakalardan meydana gelen akiferlere basınçlı akifer denir. Yeraltı suyunun üst yüzeyi hava ile temas halinde ise buna basınçsız akifer denir. Üçüncü bir halde ise, alt ve üst tabakalardan en az birinde sızma vardır ve buna sızıntılı akifer denir. Akifer parametrelerinin elde edileceği yeraltı suyu problemleri, genellikle kuyu testleri ile yeraltı suyunun kararlı ve kararsız akım durumları için ayrı ayrı incelenmektedir. Bir kuyudan sabit debi ile su çekildiğinde kuyudaki düşü hemen sabit hale gelmez, zaman içinde gittikçe artar. Su taşıyan tabakada alınan debiyi karşılayacak kaynak mevcut ise bir süre sonra kuyudaki düşü sabit hale gelir. Düşüdeki sabitlenmeye kadar geçen süre içinde kuyuya gelen akıma kararsız akım hali veya zamana bağlı akım denir. Diğer yandan düşünün sabitlendiği ve daha fazla değişmediği durumda kuyuya gelen akıma kararlı akım hali veya zamandan bağımsız akım denir.

Bu çalışmada; basınçsız akifer, kararsız akım durumu çalışılmıştır. Çalışmanın temel amaçlarından biri hidrolik iletkenliğe ulaşmaktır. Önemli akifer parametrelerinden olan hidrolik iletkenlik K simgesi ile gösterilmektedir. Ortamın akımı iletim kapasitesinin bir ölçüsüdür. Hidrolik iletkenliğin değeri, mekana ve yöne bağlı olarak değişir. Hem boşluklu ortamın hem de akışkanın özellikleriyle ilişkili olan K , ayrıca sadece zeminin

özelliğine bağlı olan özgün permeabilite (k) değerine de bağlıdır (denklem (2.1)). Özgün permeabilite, zeminin porozitesine, tane biçimine ve granülometresine bağlıdır.

$$k = cd^2 \quad (2.1)$$

k =Özgün permeabilite [L^2]

c =Boyutsuz bir katsayı [-]

d =Ortalama boşluk çapı [L]

Özgün permeabilite ile hidrolik iletkenlik arasında ilişki şu şekildedir:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.2)$$

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

γ =Akışkanın özgül ağırlığı [$MT^{-2}L^{-2}$]

μ =Dinamik viskozite [$ML^{-1}T^{-1}$]

Aşağıda Çizelge 2.1'de değişik zemin türleri için K değerlerine yer verilmiştir (Bear 1972).

Çizelge 2.1. Değişik zemin türlerine göre hidrolik iletkenlik değerleri (Bear 1972)

K (cm/sn)	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
Görelî geçirgenlik	Geçirgen				Yarı geçirimli				Geçirimsiz				
Akifer	İyi				Yoksul				-				
Konsolide kum -çakıl	İyi dağılımlı çakıl	İyi dağılımlı kum veya kum ve çakıl			Çok İnce Kum, Silt, Lös, Tın				-				
Konsolide kil -organik					Turba		Kil		Şişkin aşınmamış kil				
Konsolide kaya	Çok çatlaklı kaya				Petrol rezervuar kaya		Kumtaşı		Kalker, dolomit		Granit		

Hidrolik iletkenlik laboratuvarında da, arazide de ölçülebilir. Laboratuvarında ölçümü için permeametre denilen aletler mevcuttur. Arazi ölçümleri ise şu şekildedir; Tek bir kuyuda ya da birden fazla kuyuda zamana bağlı seviye ölçümleri alınarak çeşitli analitik hesaplamalar ile K bulunabilir veya belli bir noktadan akifere verilen bir maddenin (izleyicinin) bir gözlem kuyusuna erişmesi için geçen zaman ölçülür. Buradan yeraltısuyu akımının gerçek hızı (V_g) bulunur. Denklem (2.3) yardımıyla porozite (n) ve su yüzeyinin eğimi (I) kullanılarak (K) değeri hesaplanabilir (Darcy 1856).

$$V_g = \frac{K I}{n} \quad (2.3)$$

Gerçek hızın belirlenmesi zor olduğu için iki nokta arasındaki akımı tanımlamada spesifik akım kavramı daha yaygın olarak kullanılır (2.4).

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2.4)$$

q =Spesifik akım [LT^{-1}]

Δh =İki nokta arasındaki piyezometrik yük farkı [L]

ΔL =İki nokta arasındaki mesafe [L]

Değnilmesi gereken bir diğer ifade, piyezometrik yüküdür. Piyezometrik yük, herhangi bir noktaya yerleştirilen piyezometredeki su yüksekliği ile seçilen referans noktasına olan düşey mesafenin toplamıdır.

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (2.5)$$

h =Piyezometrik yük [L]

p =Basınç [$ML^{-1}T^{-2}$]

γ =Akışkanın özgül ağırlığı [$MT^{-2}L^{-2}$]

z =Seçilen referans noktasına olan düşey mesafe [L]

Bir ortamın herhangi bir özelliği mekandan bağımsız olarak ortam içindeki tüm noktalarda aynı ise o ortam o özellik için homojendir denir. Aksi halde heterojendir. Bir ortamın bir özelliği her yönde aynı ise o ortam o özellik için izotropik bir ortamdır. Aksi halde anizotropiktir denir. Homojen ve izotropik akiferlerde her noktada ve her yönde hidrolik iletkenlik sabittir. Böyle bir durumda, bir noktadaki x, y ve z yönlerindeki spesifik akımlar aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$q_x = -K \frac{dh}{dx} \quad (2.6)$$

$$q_y = -K \frac{dh}{dy} \quad (2.7)$$

$$q_z = -K \frac{dh}{dz} \quad (2.8)$$

Yeraltı suyu hidrolojisinde kullanılan bir diğer önemli parametre özgül verimdir (S_Y). Bu parametre su tablasındaki (Δh) birim alçalma veya yükselme sonucu birim yatay alandan (ΔA) depolanmadan çıkan veya depolanmaya giren suyun hacmidir (ΔV_w), kabaca akiferin suyu depolama potansiyelini temsil eder ve yaklaşık olarak efektif poroziteye eşittir. Aşağıdaki denklemlerle tanımlanır:

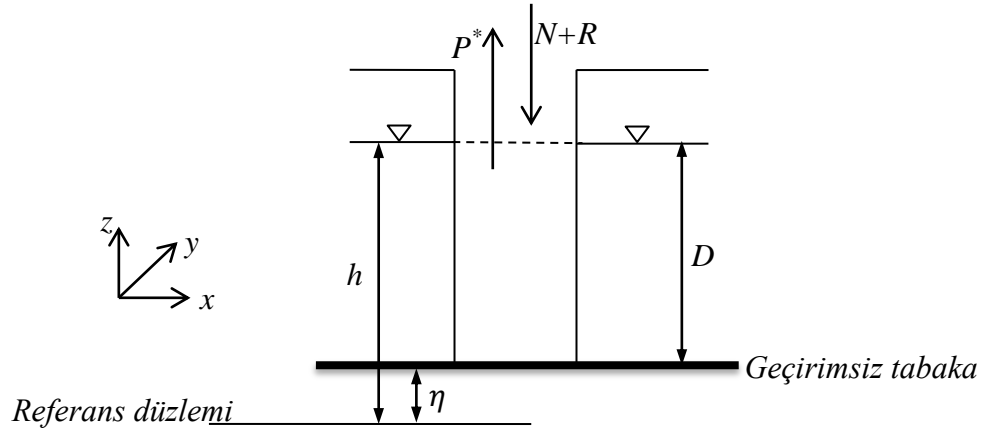
$$S_Y = \frac{\Delta V_w}{\Delta A \Delta h} \quad (2.9)$$

Yeraltı suyu problemlerinin çözümünde temelde yatay akım varsayımı ve Dupuit varsayımı (Dupuit 1863) oldukça önemlidir. Akiferler, kalınlıkları incelendiğinde genelde yatay düzlemdeki uzunluklarına göre ince kalırlar. Bu sebepten akımın düşey bileşeni ihmal edilip, temelde yatay akım varsayımı yapılır. Buna hidrolik yaklaşım veya akifer yaklaşımı da denir. Dupuit varsayımında;

- Akım temelde yatay akımdır.
- Eşpotansiyel eğrileri düşeydir.
- Akım çizgileri yataydır.
- Basınç dağılımı hidrostatiktir.

2.1. Basınçsız Akiferlerde Yöneten Denklemler

İki boyutlu sızıntısız, basınçsız akiferin yöneten diferansiyel denklemine (2.10) ve yeraltı suyu akım kesitine (Şekil 2.1) aşağıda yer verilmiştir:



Şekil 2.1. Yeraltı suyu akım kesiti

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + N + R - P^* = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.10)$$

h =Ana akiferin piyezometrik yükü [L]

η =Ana akiferin taban yüksekliği [L]

N =Doğal beslenmenin dağıtılmış oranı [LT^{-1}]

R =Yapay beslenmenin dağıtılmış oranı [LT^{-1}]

P^* =Pompajın dağıtılmış oranı [LT^{-1}]

K_x =Ana akiferin x yönündeki hidrolik iletkenliği [LT^{-1}]

K_y =Ana akiferin y yönündeki hidrolik iletkenliği [LT^{-1}]

S_y =Özgül verim [-]

2.2. Başlangıç ve Sınır Koşulları

Başlangıç koşulları zamana bağlı akımlarda kullanılır. Sınır koşulları ise; belirlenmiş piyezometrik yük sınırı, belirlenmiş akı sınırı, yarıgeçirgen sınır, farklı boşluklu ortamlar arası sınır, serbest yüzey, sızma yüzeyi, kuyu, kaynak ve benzeri şekilde tanımlanabilir. Sınır koşullarından en çok karşılaşılan, belirlenmiş piyezometrik yük sınırı ve belirlenmiş akı sınır koşuludur. Akifer yakınındaki bir su kütlesi (örneğin bir göl) belirlenmiş piyezometrik yük sınır koşuluna örnektir. Belirlenmiş piyezometrik yük sınır koşulunda zamana bağlı olmayan durumlarda:

$$h = \text{sabit} \quad (2.11)$$

Zamana bağlı durumlarda:

$$h = f(t) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir.

Yüzeye kadar yükselen geçirimsiz bir kaya tabakası varsa bu da belirlenmiş akı sınır koşuluna örnektir. Bu durumda belirlenmiş akı sınır koşulu;

$$q_n = -K \frac{dh}{dn} \quad (2.13)$$

$$q_n = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{dh}{dn} = 0 \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir.

$q_n = n$ yönündeki spesifik akım [L/T]

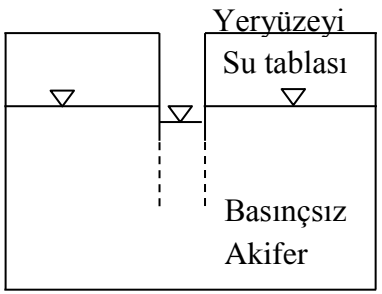
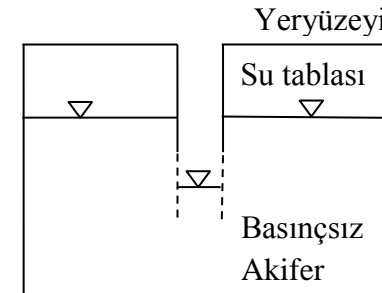
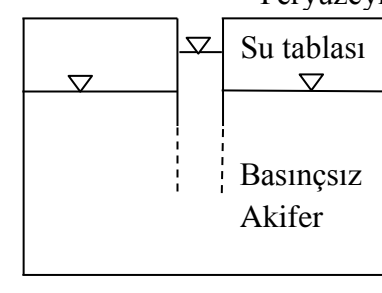
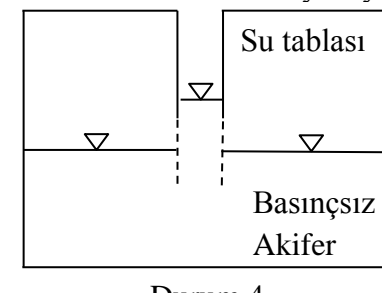
3. AKİFER TESTLERİNDE KULLANILAN ANALİTİK METOTLAR

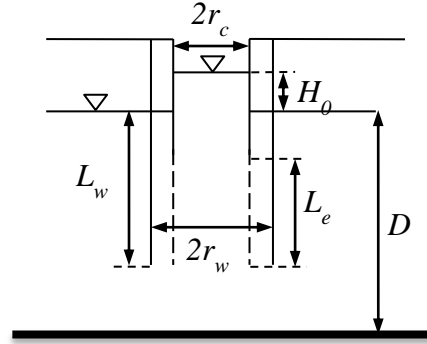
Hidrolik parametrelerin belirlenmesi amacıyla kuyularda test düzeneğinin kurulması, test verilerinin toplanması ve analizinin yapılması işlemlerine akifer testleri veya kuyu testleri denir. Bu çalışmada slug test, kademeli pompalama testi, geri dönüş testi ve çoklu pompaj testi kullanılarak akiferin hidrolik iletkenliği belirlenmeye çalışılmıştır.

3.1. Slug Test

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 3.1). 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. Basıncsız akiferlerde slug testte karşılaşılabilecek tüm durumlara Çizelge 3.1’de yer verilmiştir (Mays 2011). Bu tez çalışmasında, Çizelge 3.1’deki 3 nolu durum mevcuttur.

Çizelge 3.1. Basınçsız akiferlerde slug testte karşılaşılabilecek durumlar

No:	Durum:	Analitik Çözüm Metodu:	Akifer Kesiti:
1	Basınçsız akifer, tamamen veya kısmen delen kuyu, su seviyesi kuyu gözenekleri üzerinde ise (yükselen seviye testi)	*Bouwer ve Rice Metot(1976) *Dagan Metot(1978) (Butler 1998) *KGS(Kansas Geological Survey)(Butler 1998)	 <p>Yeryüzeyi Su tablası Basınçsız Akifer</p> <p>Durum 1</p>
2	Basınçsız akifer, tamamen veya kısmen delen kuyu, su seviyesi kuyu gözeneklerinin tepe noktasının altına düşmüş ise (yükselen seviye testi)	*Bouwer ve Rice Metot *Dagan Metot	 <p>Yeryüzeyi Su tablası Basınçsız Akifer</p> <p>Durum 2</p>
3	Basınçsız akifer, tamamen veya kısmen delen kuyu, su seviyesi kuyu gözeneklerinin çok üzerinde ise (düşen seviye testi)	*Bouwer ve Rice Metot *Dagan Metot *KGS(Kansas Geological Survey)	 <p>Yeryüzeyi Su tablası Basınçsız Akifer</p> <p>Durum 3</p>
4	Basınçsız akifer, tamamen veya kısmen delen kuyu, kuyu gözenekleri su tablasıyla çakışır, bu durumun pratikte uygulanması anlam ifade etmez (düşen seviye testi)	-	 <p>Yeryüzeyi Su tablası Basınçsız Akifer</p> <p>Durum 4</p>



Şekil 3.1. Basınçsız akiferde kuyuya aniden su bırakılmasıyla oluşan durum

3.1.1. Bouwer ve Rice metodu

Bouwer ve Rice Metodu (Bouwer ve Rice 1976; Bouwer 1989; Ztolnik 1994) orjinal modeli izotropik durumlar için tanımlanmıştır. Ztolnik (1994) anizotropik durumlar için metodu geliştirmiştir. Bouwer ve Rice Metodu, başlangıçta basınçsız akiferler için geliştirilmiş olmasına rağmen, kuyu filtresi basınçlı katmanın tabanının üstünde belirli mesafede bulunuyorsa basınçlı akiferlerde de kullanılabilir. Slug teste birtakım kabuller altında analitik çözümler geliştirilmiştir. Bu kabulleri şu şekilde sıralayabiliriz (Kruseman ve de Ridder 1990).

- Akifer, yatay düzlemde sonsuz büyüklüğe sahiptir.
- Akifer, homojen, izotropik ve sabit kalınlıktadır.
- Yeraltı suyunun yoğunluğu ve viskozitesi sabittir.
- Test öncesinde, akiferdeki su tablası ya da piyezometrik yüzey yatay durumdadır.
- Kuyudaki hidrolik yük, $t=0$ 'da aniden değişir ve bu anda kuyu etrafındaki su tablasındaki değişiklik ihmal edilir.

- Kuyudaki su seviyesindeki salınım ile lineer ve non-lineer kuyu kayıpları göz ardı edilebilir seviyededir.
- Kuyu, akiferin doygun kalınlığını kısmen veya tamamen delmektedir.
- Kuyu çapı sonludur ve dolayısıyla kuyudaki depolanma ihmal edilemez.
- Kuyuya giren veya çıkan su yatay yönde iletilir.

Metodun analitik çözümü için aşağıdaki formüller tanımlanmıştır (Şekil 3.1).

$$H_0 = \frac{V}{\pi r_c^2} \quad (3.1)$$

H_0 =Su bırakıldıktan hemen sonraki düşü [L]

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

r_c =Kapalı (filtresiz) borunun yarıçapı [L]

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H(t)}\right) \quad (3.2)$$

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

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

R_e =Yük değişiminin dağıldığı etkili mesafe [L]

L_e =Kuyuda suyun girdiği filtrenin uzunluğu (filtreli kısmın uzunluğu) [L]

t =Zaman [T]

$H(t)$ =Zamana bağlı düşü [L]

R_e aynı zamanda kuyudan itibaren ortalama K değerinin ölçüldüğü karakteristik mesafedir. Ancak, belirli bir kuyu için R_e 'nin değeri bilinemez. K değerini hesaplamak için gereken $\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)$ değeri hesaplaması aşağıda verilmiştir (Bouwer ve Rice 1976; Bouwer 1989):

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

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1,1}{\ln\left(\frac{L_w}{r_w}\right)} + \frac{X + Y \ln\left(\frac{D - L_w}{r_w}\right)}{\frac{L_e}{r_w}} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

- b) $L_w=D$ ise;

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1,1}{\ln\left(\frac{L_w}{r_w}\right)} + \frac{Z}{\frac{L_e}{r_w}} \right]^{-1} \quad (3.4)$$

X, Y, Z boyutsuz parametreleri L_e/r_w değerine bağlı olup Şekil 3.2'deki abaktan bulunur. Bulunan hidrolik iletkenlik değeri, r_w ve L_e ne kadar büyükse akiferin o kadar büyük bir kısmını temsil eder (Mays 2011).

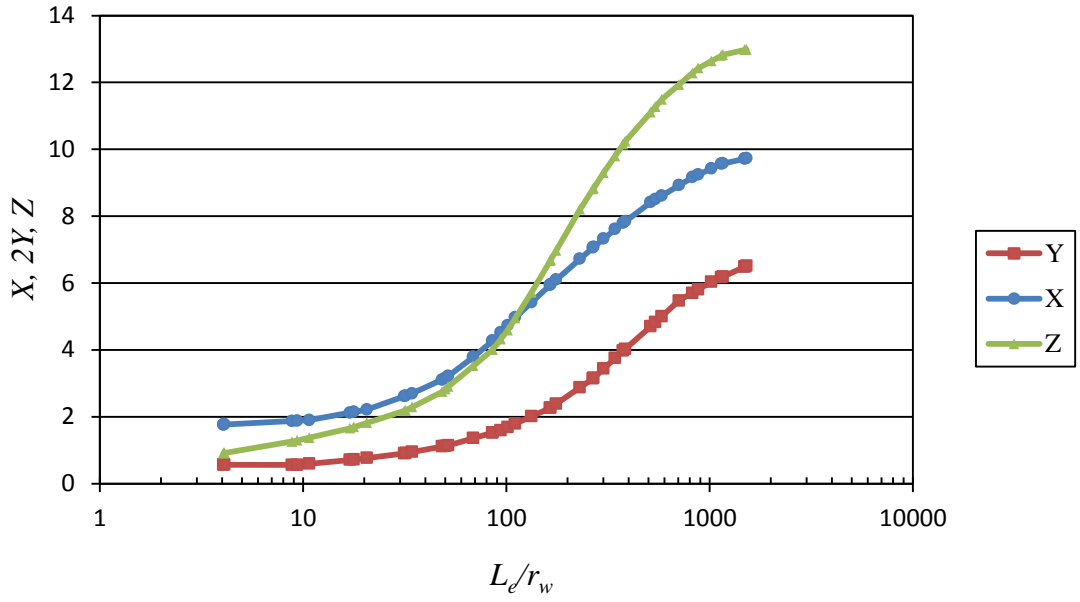
İşlem adımları;

1. Öncelikle logaritmik düşey eksene $H(t)/H_0$ değerleri, aritmetik yatay eksene ise zaman (t) değerleri işaretlenir. İşaretlenen noktalara bir düz çizgi uydurulur. Burada iki farklı durum söz konusudur. Eğer su çekildiğinde seviye, filtreli kısma kadar düşmüşse erken zamanlarda su seviyesi hızlıca eski haline dönme eğilimi gösterir. Bunun sebebi çakıl zarfındaki suyun hızlı bir şekilde kuyuya süzülmesidir. Bu sebepten $H(t)/H_0$ değerleri erken ve ileri zamanlar olmak üzere iki düz çizgi üzerine yayılırlar. İkinci durumda ise, eğer su çekildiğinde seviye

filtreli kısma kadar düşmüyorsa, $H(t)/H_0$ değerleri direkt olarak düz bir çizgi oluşturur. Çok ileri zamanlarda bu düz çizgi her iki durumda da bozulabilir. Eğer ikinci durumda da erken zamanda ayrı bir çizgi oluşmuşsa kapalı (filtresiz) borularda sızma olduğu anlamına gelir. Ana düz çizgi bölümü, çakıl zarfındaki su seviyesi kuyudaki su seviyesine eşit olduğunda oluşur. Bu durumda akım, çakıl zarfı dışındaki akifer tarafından kontrol edilir.

2. L_e/r_w değerine karşılık gelen X, Y, Z değerleri Şekil 3.2'teki abaktan okunur.
3. Yukarıdaki (a) ve (b) durumlarından uygun olan formül seçilir, hesaplanır.
4. $H(t)=0,368H_0$ seçilerek denklem (3.2)'de $\ln\left(\frac{H_0}{H(t)}\right)$ 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 (3.5)'te yerine konularak hidrolik iletkenliğe ulaşılır.

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_e} \frac{1}{t_{new}} \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. X, Y, Z boyutsuz parametrelerinin L_e/r_w 'nun bir fonksiyonu olarak gösterilmesi (Bouwer ve Rice 1976)

3.1.2. Dagan metodu

Dagan (1978), 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, yatay eksene ise zaman (t) değerleri işaretlenir. İşaretlenen noktalara bir düz çizgi uydurulur.
2. Düz çizgi geriye doğru uzatılarak y eksenini ($H(t)/H_0$ 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 ψ denklem (3.6) ile bulunur (Genelde $K_z/K_r=1$ alınır).

$$\psi = \frac{\sqrt{\frac{K_z}{K_r}}}{L_e/r_w} \quad (3.6)$$

4. Bulunan ψ değerini kullanarak Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 veya Çizelge 3.4'ten duruma uygun olan biri kullanılarak boyutsuz akım parametresi P değerine ulaşılır.

Çizelge 3.2. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve $L_e/D \leq 0,05$ ise) Butler (1998)

ψ	$(L_w+L_e)/L_e$				
	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 3.3. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Kuyu gözenekleri su tablasının altında ve $(L_w+L_e)=D$ ise) Butler (1998)

ψ	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

Çizelge 3.4. Dagan metodu için boyutsuz akım parametresi (P) değerleri (Basıncılı formasyonlar için)($L_e/D \leq 0,05$ ise) Butler (1998)

ψ	$(L_w+L_e)/L_e$				
	8	4	2	1,5	1,05
0,20	0,741	0,727	0,681	0,640	0,561
0,10	0,539	0,533	0,505	0,483	0,432
0,067	0,458	0,455	0,432	0,416	0,377
0,050	0,412	0,408	0,390	0,378	0,345
0,033	0,359	0,357	0,343	0,331	0,307
0,025	0,328	0,325	0,314	0,305	0,285
0,020	0,307	0,305	0,295	0,288	0,270
0,013	0,275	0,273	0,263	0,259	0,245
0,010	0,254	0,254	0,246	0,240	0,230
0,0067	0,232	0,230	0,224	0,218	0,211
0,0050	0,218	0,216	0,210	0,205	0,199

5. Son olarak denklem (3.7)'den yararlanarak hidrolik iletkenlik elde edilir.

$$K_r = \frac{r_c^2 \left(\frac{1}{P}\right)}{2L_e t_{new}} \quad (3.7)$$

3.2. Pompalama Testleri

Pompalama testi tek bir kuyuda sabit debi ile kararlı hal oluşana kadar yapılan testtir. Kuyudaki su seviyesi durgun hale geldiğinde pompalama işlemine son verilir. Pompalama süresi çalışılan arazideki zemin özelliğine ve debiye göre değişir.

Pompalama yapılan kuyuda alçalmanın iki bileşeni vardır. Bunlardan biri akifer kaybı diğeri kuyu kaybıdır. Kuyu performans testleri bu kayıpları belirlemek için yapılır. Akifer kaybı, laminar akımın meydana geldiği akiferlerdeki yük kaybıdır. Kuyu kaybı

ise linear ve non-linear yük kaybı olmak üzere iki çeşittir. Linear kuyu kayıpları kuyunun oluşturulması sırasında akifere verilen zarardan ötürü oluşur. Non-linear kuyu kayıpları ise türbülanslı akımın olduğu emme borusunda ve kuyu gözeneklerinin iç kısmında meydana gelen sürtünme kayıplarıdır. Tüm bu kayıplar, kuyu içindeki alçalmanın teoride beklenenden çok daha büyük bir ölçüde olmasına sebep olur (Kruseman ve de Ridder 1990).

3.2.1. Kademeli pompalama testleri

Kademeli pompalama testi tek bir kuyuda yapılır. Öncelikle düşük sabit debi ile pompalamaya başlanır. Su seviyesi sabit hale geldiğinde vana açılarak debi arttırılır 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 (1947) çalışmıştır. Pompaj kuyusundaki alçalma için aşağıda verilen Jacob eşitliğini geliştirmiştir.

$$s=B(R_e,t)Q+CQ^2 \quad (3.8)$$

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

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

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

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

$$R_e=\text{Etki yarıçapı [L]}$$

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

$$t=\text{Pompalama süresi [T]}$$

$$s=\text{Düşü [L]}$$

Rorabaugh, Jacob eşitliğini (3.8) $s=BQ+CQ^P$ şeklinde okunmasını önermiştir. (3.9)'nolu denkleme Rorabaugh eşitliği denilmektedir. P değeri 1,5 ile 3,5 arasında bir değerdir (Lennox 1966). Diğer yandan, Jacob (1947)'un önerdiği $P=2$ değeri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$s=BQ+CQ^P \quad (3.9)$$

Bu testi analiz etmek için çeşitli metotlar mevcuttur. Bu metotlar Jacob eşitliğini temel alır. Hantush-Bierschenk metodu ile B , C değerleri belirlenir. Basıncılı, sızıntılı ve basınçsız akiferlerde uygulanabilir. Eden-Hazel (1973) metodu basınçlı akiferlerde kullanılır. Kuyu kaybı parametrelerinin yanında geçirgenlik değerine ulaşılır. Rorabaugh (1953) ve Sheahan (1971) metotları ise basınçlı, sızıntılı ve basınçsız akiferlerde uygulanabilir. Bu metotlar B , C ve P değerlerini verir. Bahsedilen B , C ve P 'nin bulunması sonucunda, farklı debiler için kuyuda oluşabilecek düşü tahmini yapılır.

3.2.1.1. Hantush-Bierschenk metodu

Hantush (1964) ve Bierschenk (1963) aşağıda belirtilen kabuller altında bu yöntemin uygulanabilmesini önermişlerdir. Kabuller;

1. Akifer basınçlı, sızıntılı veya basınçsız olabilir.
2. Akifer, yatay düzlemde sonsuz büyüklüğe sahiptir.
3. Akifer, homojen, izotropik ve sabit kalınlıktadır.
4. Pompalamadan önce, piyezometrik yüzey yatay durumdadır.
5. Her kademedede pompalanan debi sabit ve bir önceki kademedden yüksek olmalı.
6. Kuyuya giren su yatay yönde iletilir.
7. Kuyudaki akım kararsız haldedir.
8. Non-lineer kuyu kayıpları tahmin edilebilir düzeydedir ve CQ^2 değerine bağlıdır.

Hantush (1964) yukarıda bahsedilen Jacob eşitliğine (denklem(3.8)) süperpozisyon prensibi uygulayarak kademeli pompalama testinin n . kademesi boyunca kuyudaki alçalmayı aşağıdaki şekilde ifade etmiştir:

$$s_{w(n)} = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i B(R_e, t - t_i) + C Q_n^2 \quad (3.10)$$

$s_{w(n)}=t$ zamanında n . kademe boyunca kuyudaki toplam alçalma [L]

R_e =Kuyunun etki 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}]

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

Herbir kademenin başlangıcından sabit bir zaman aralığı (Δt) alınarak yine herbir kademe için $\Delta s_{w(i)}$ alçalmaların toplamı denklem (3.11)'deki gibi yazılmıştır.

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_{w(i)} = s_{w(n)} = B(R_e, \Delta t) Q_n + C Q_n^2 \quad (3.11)$$

$\Delta s_{w(i)}$ i . kademe ile bunu izleyen kademe arasındaki düşü değeridir.

Arazide yapılan ölçümler sonucu, yarı logaritmik kağıtta yatay logaritmik eksene zaman, düşey eksene ise düşü değerleri aktarılır. Her bir kademedeki düşü teker teker belirlenir. Toplam düşü, herbir kademede okunan düşülerin tümü toplanarak (3.11)'de

belirtildiği gibi $s_{w(n)} = \Delta s_{w(1)} + \Delta s_{w(2)} + \dots + \Delta s_{w(n)}$ şeklinde hesaplanır. (3.11) nolu denklemin her tarafı Q_n ile bölünürse:

$$\frac{s_{w(n)}}{Q_n} = B(R_e, \Delta t) + CQ_n \quad (3.12)$$

Aritmetik kağıdın düşey eksenine $\frac{s_{w(n)}}{Q_n}$ değeri, yatay eksenine ise Q_n değerleri işaretlenir. Bu noktalardan geçen bir doğru çizilir. Bu doğrunun eğimi C 'dir. Doğrunun $\frac{s_{w(n)}}{Q_n}$ eksenini kestiği nokta ise B 'dir. Denklem (3.8)'de bulunan B ve C değerleri yerine konularak istenilen debi değerindeki düşü bulunabilir.

3.2.1.2. Rorabaugh metodu

Aşağıda belirtilen kabuller altında bu yöntem uygulanır (Rorabaugh 1953);

1. Akifer basınçlı, sızıntılı veya basınçsız olabilir.
2. Akifer, yatay düzlemde sonsuz büyüklüğe 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 yüksekte olmalıdır.
6. Kuyuya giren su yatay yönde iletilir.
7. Kuyudaki akım kararsız haldedir.
8. Non-linear kuyu kayıpları tahmin edilebilir düzeydedir ve CQ^P değerine bağlıdır.

Süperpozisyon prensibi (3.9) nolu denkleme yani Rorabaugh eşitliğine uygulanırsa düşü ifadesi (3.13) halini alır.

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_{w(i)} = s_{w(n)} = BQ_n + CQ_n^P \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ün iki tarafı da Q_n 'e bölünürse (3.14) elde edilir.

$$\frac{s_{w(n)}}{Q_n} = B + CQ_n^{P-1} \quad (3.14)$$

(3.14) düzenlenirse (3.15) halini alır.

$$\log \left(\frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B \right) = \log C + (P - 1) \log Q_n \quad (3.15)$$

Öncelikli olarak yarı logaritmik kağıtta yatay logaritmik eksene zaman, düşey aritmetik eksene ise düşü değerleri aktarılır. Her bir kademedeki düşü teker teker belirlenir. Toplam düşü, her bir kademedeki okunan düşülerin 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 $\left(\frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B_i \right)$ değerleri hesaplanır. Tam logaritmik kağıdın düşey eksenine $\left(\frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B_i \right)$, yatay eksenine ise Q_n değerleri işlenir. Farklı B değerleri için bu işlem tekrarlanır. Çıkan eğrilerden düz bir çizgi halinde olan seçilir. En düz çizgisini veren B_i değeri, B 'nin gerçek değeridir. Düz çizginin eğimi bulunur. Bulunan eğim, $(P-1)$ 'e eşittir. $Q_n=1$ eksenini ile bu düz çizginin kesişim noktası bulunur. Düşey eksenden okunan $\left(\frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B \right)$ 'nin bu değeri C 'ye eşittir. Denklem (3.9)'da bulunan B , C ve P değerleri yerine konularak istenilen debi değerindeki düşü bulunabilir.

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 gözlenebilir. Su seviyesinin yükselimi sırasında, su seviyesi ile başlangıçtaki su seviyesi arasındaki mesafeye “artık düşü” 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 (Kruseman ve de Ridder 1990). Pompalama deneyleri sonrası kuyuda hesaplanan artık düşü denklem (3.16)’da gösterilmiştir (Theis 1935).

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] \quad (3.16)$$

s' =Artık düşü [L]

Theis kuyu fonksiyonuna aşağıda yer verilmiştir:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \dots \quad (3.17)$$

(3.16)’daki u' değişkeni aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u' = \frac{r^2 S'}{4T t'} \quad (3.18)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4T t} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)’daki u ve (3.18)’deki u' yeteri kadar küçük olduğunda ($u < 0,01$), düşü değerinin yaklaşık değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{4Tt}{r^2 S} - \ln \frac{4Tt'}{r^2 S'} \right] \quad (3.20)$$

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 =Geçirgenlik [L^2T^{-1}]

➤ S ve S' sabit, eşit ve T sabit ise denklem (3.20), (3.21)'deki halini alır.

$$s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (3.21)$$

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

$$\Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \quad (3.22)$$

şeklindedir. Denklem (3.22)'de Q ve $\Delta s'$ değerleri yerine konularak T değerine ulaşılır. Bu değer doygun kalınlığa bölünerek K bulunur.

3.2.3. Çoklu pompaj testi

Bu test akiferin hidrolik iletkenliğine ulaşmak amacıyla yapılır. Basıncılı akiferler için Theis (1935) eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3.23)$$

(3.17)'de Theis kuyu fonksiyonundaki u 'nun küçük değerleri için (3.23) düzenlendiğinde kuyudaki alçalma aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{R_e^2 S} \quad (3.24)$$

s =Düşü [L]

R_e =Kuyunun etki yarıçapı [L]

t =Pompalamanın başladığı andan itibaren geçen zaman [T]

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

T =Geçirgenlik [L^2T^{-1}]

S =Depolama katsayısı [-]

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

(3.24) nolu denkleme kuyu kaybı da eklenirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{R_e^2 S} + CQ^2 \quad (3.25)$$

Buradaki C kuyu kaybı katsayısıdır (Jacob 1946). Denklem (3.25) aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$s = a(b + \log t)Q + CQ^2 \quad (3.26)$$

(3.26) nolu denklemdeki a ve b ifadelerine aşağıda yer verilmiştir.

$$a = \frac{2,3Q}{4\pi T} \quad (3.27)$$

$$b = \log \frac{2,25T}{R_e^2 S} \quad (3.28)$$

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

$$s_n = a(b + \log t)Q_n + CQ_n^2 \quad (3.29)$$

(3.29) nolu denklemin her iki tarafı Q_n ile bölünürse denklem (3.30) halini alır. $a(b + \log t)$ ifadesine A denilirse denklem (3.31) elde edilir.

$$s_n/Q_n = a(b + \log t) + CQ_n \quad (3.30)$$

$$\frac{s_n}{Q_n} = A + CQ_n \quad (3.31)$$

Birtakım düzenlemeler yapılırsa;

$$A_n - A_{n-i} = a(b + \log t_n) - a(b + \log t_{n-i}) \quad (3.32)$$

$$= a \log \left(\frac{t_n}{t_{n-i}} \right) \quad (3.33)$$

$$= \frac{2,3}{4\pi T} \log\left(\frac{t_n}{t_{n-i}}\right) \quad (3.34)$$

Yukarıdaki denklemler elde edilir. Denklem (3.34) yardımıyla (3.35)'e ulaşılır.

$$T = \frac{2,3 \log\left(\frac{t_n}{t_{n-i}}\right)}{4\pi(A_n - A_{n-i})} \quad (3.35)$$

Aritmetik kağıda s_n/Q_n 'e karşı Q_n değerleri aktarılır. Bu değerlere bir doğru otutturulur. Herbir t değeri için bir adet düz çizgi elde edilir. Bu doğruların s/Q eksenini kestiği nokta A , doğruların eğimi ise C 'dir. Birbirine en yakın C değerleri için A ve t çifti seçilir. (3.35) nolu eşitlik kullanılarak geçirgenlik elde edilir (Nahm 1980). Bu değer doymun kalınlığa bölünerek K bulunur. Bu test basınçlı ve basınçsız akiferler için kullanılır. Kuyudaki düşü s iken basınçsız akiferlerde bir düzeltme ile denklem (3.36)'da yer alan düzeltilmiş düşü elde edilir.

$$s^* = s - s^2/2D \quad (3.36)$$

s^* =Düzeltilmiş düşü [L]

D =Akiferin doymun kalınlığı [L]

4. ARAZİ ÇALIŞMASI

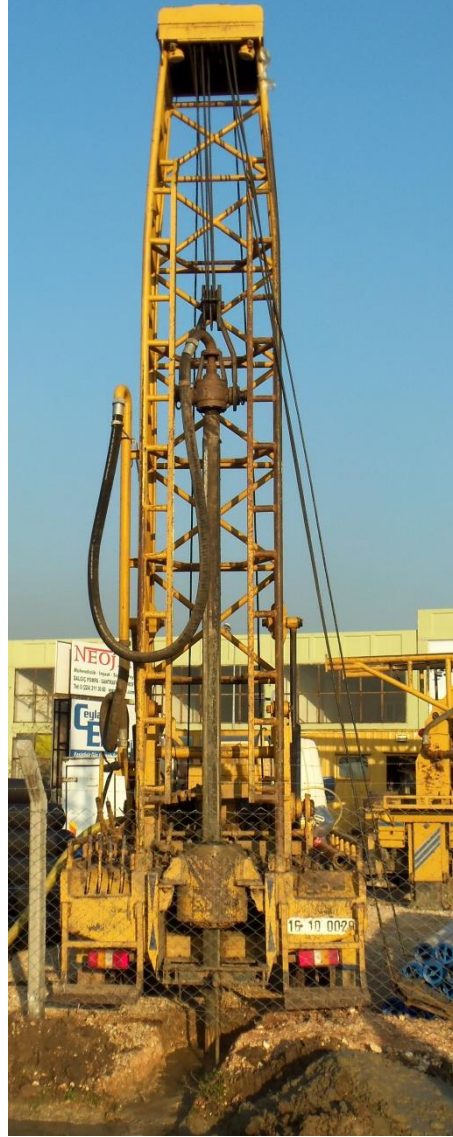
Bu çalışma kapsamında, Neojen Mühendislik tarafından Bursa Küçük Sanayi bölgesinde bulunan basınçsız akiferde iki kuyu açılmıştır (Şekil 4.1). Açılan 1. kuyu 27 metre derinliğindedir ve bu kuyuda pompalama deneyleri yapılmıştır. 20 metre derinliğindeki 2. kuyuda ise slug testler yapılmıştır. Açılan bu iki kuyu arasında 33

metre mesafe bulunmaktadır. Gerek zemin cinsinden gerekse arazide yapılan çalışmalar sonucu, kullanılan debiler ölçütünde bu iki kuyunun birbirlerinden etkilenmediği anlaşılmıştır.

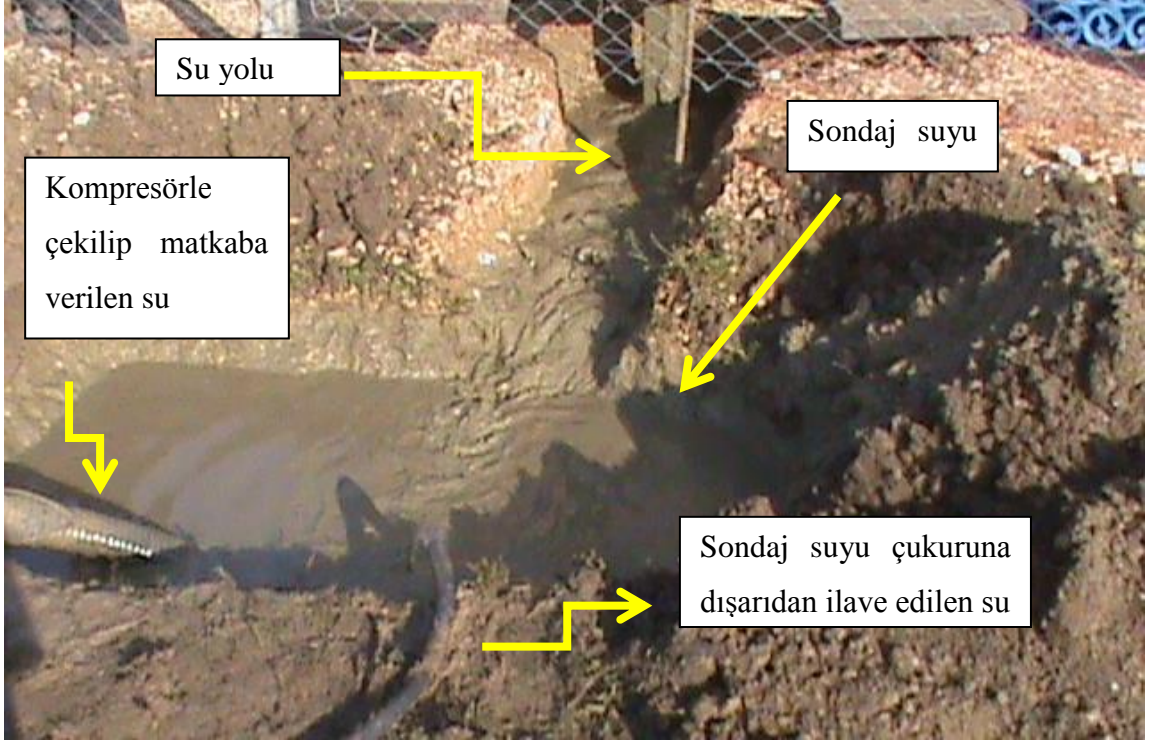


Şekil 4.1.Arazide açılan kuyular

Gevşek ve akıcı zeminler olarak adlandırılan nebati toprak, kil, kum tipi malzemeler sondaj sırasında dökülme ve çökme yapabildiklerinden dolayı bu tip malzemelerden oluşan zeminlerde rotary-çamurlu sondaj yöntemi uygulanmaktadır. Kesici ve öğütücü bir matkabı döndürmek suretiyle zemin içinde kırılan parçalar sondaj çamuru vasıtası ile dışarı atılarak meydana gelen boşluk içersinde ilerlenilerek zemin delinir. Kuyuların delinmesi esnasında Şekil 4.2’de görülen sondaj makinesi kullanılmıştır. Rotary-çamurlu sondaj yönteminin uygulanmasında, öncelikle sondaj kuyusunun açılacağı yere yakın bir yere sondaj suyu çukuru açılır. Sondaj suyu çukurunun derinliği yaklaşık olarak 2 metredir. Sondaj suyu çukurundan sondaj kuyusunun açılacağı yere su yolu yapılır (Şekil 4.3). Delme işlemi elmas uçlu matkapla gerçekleştirilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.2.Sondaj makinesi



Şekil 4.3. Sondaj suyu çukuru, su yolu



Şekil 4.4. 250 mm çapındaki matkap

Matkabın formasyonu delmesi esnasında sürtünmeden dolayı oluşacak olan ısınmayı dolayısıyla matkabın aşınmasını ve motorun yanmasını önlemek amacıyla sondaj

makinesine su verilmektedir. Sondaj ukurundaki pompa ile çekilen su delme takımının içerisine verilir. Sondaj suyu çukurunda su azaldığında ise dışarıdan su ilave edilir (Şekil 4.3). Delme işlemi; sondaj makinesine sabit 4 metrelik bir boru ve 3'er metrelik tijler ile sağlanmaktadır (Şekil 4.5). Derinlere inmek için tijler u uca eklenir.



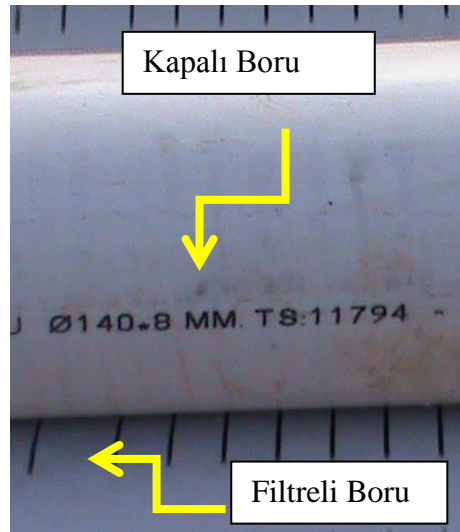
Şekil 4.5. Tij

Delme işlemi esnasında her bir metrede bir numune rneėi alınmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Sondaj esnasında alınan numune örnekleri

Delme işlemi istenilen derinliğe kadar tamamlandıktan sonra zeminin içindeki tıjlar teker teker çıkartılır. Alınan numuneler incelenerek içinde su bulduran katmanlar işaretlenir. Sondaj boruları genelde 4 metre uzunlukta filtreli veya kapalı (filtresiz) PVC borulardan oluşmaktadır (Şekil 4.7) İçinde su bulduran katmanlara karşılık gelen yerlere filtreli diğer kısımlara ise kapalı boru indirilir. En derine indirilen borunun ucunda başlık vardır (Şekil 4.8).



Şekil 4.7. Kapalı boru(filtresiz), filtreli boru



Şekil 4.8. En derine indirilen başlıklı boru

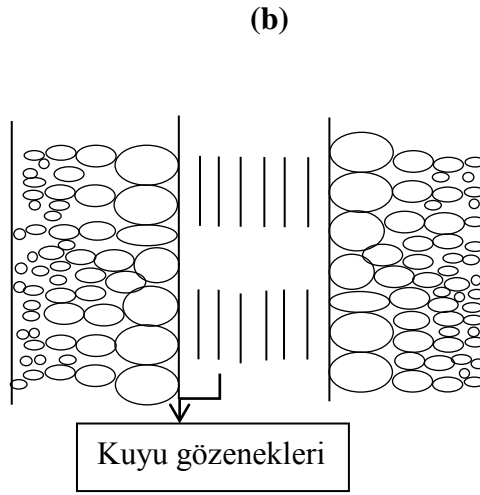
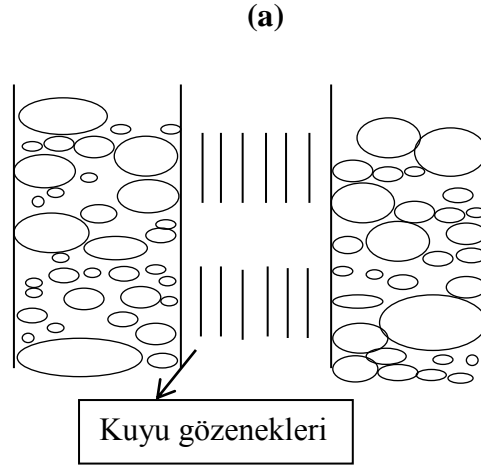
Bu çalışmada her iki kuyuda da matkapla 250 mm çapında delme işlemi gerçekleştirilmiştir. 1.kuyu pompalama deneylerinin yapıldığı kuyudur. Bu kuyu 140 mm çapında olup 27 metre derinliğe kadar inmektedir. En derinde başlıklı 4 metrelik kapalı boru üzerine filtreli boru olmak üzere toplam 7 adet PVC boru indirilmiş ve zemin üstünde kalan 1 metresi kesilmiştir. 2. kuyuya ise aynı şekilde 140 mm çapında 4'er metrelik PVC borulardan 5 adet, 20 metre derinliğe kadar inilmiştir.

Borulama işlemi tamamlandıktan sonra çakıllama işlemine geçilir. PVC sondaj borusu ile zemin arası çakılla doldurulur. Bu işlemin yapılmasındaki amaç; kuyudan su çekilmesi veya kuyuya su basılması esnasında filtreli kısımların tıkanmasını önlemektir. Çakıl dökülürken bol su verilerek kuyu sondaj çamurundan arındırılmaya çalışılır. Çakıllama esnasında bir numaralı dere çakılı tercih edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Bir numaralı dere çakılı

Özellikle dere çakılıının tercih edilme sebebi parçaların yuvarlak olup boşlukların daha iyi kapanmasıdır. Bu sayede iyi bir filtreleme sağlanmaktadır. Şekil 4.10a'da çakıllama sonrası inkişaf öncesi kuyu kesiti görülmektedir. Borulama ve çakıllama işlemlerinin ardından inkişaf işlemine geçilir. İnkişaf, kuyunun temizlenmesi işlemidir. Kuyuyu temizleyebilmek için sondaj borusunun içine çapı 63,5 mm olan kolon borusu (Şekil 4.11) ve çapı 32 mm olan hava borusu (Şekil 4.12) yerleştirilir.



Şekil 4.10. Kuyu etrafındaki çakılların dizilimi; (a) İnkişaf öncesi (b) İnkişaf sonrası



Şekil 4.11. Kolon boruları (çapı 63,5 mm)



Şekil 4.12. Hava boruları (çapı 32 mm)

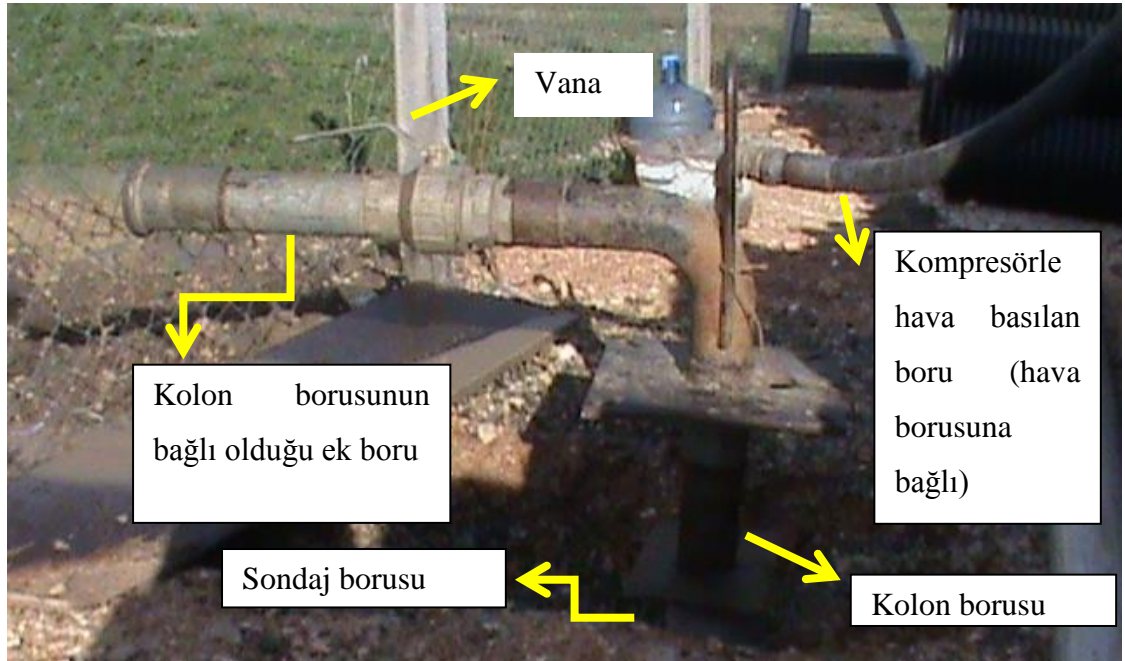
Bir hava borusunun çapı 32 mm ve uzunluğu 6 metredir. Hava borusunun dışında ise hava borusundan daha büyük çaplı kolon borusu mevcuttur. Bir kolon borusunun çapı 63,5 mm ve kolon borularının uzunluğu ise 5 metredir. Kolon borusu da hava borusu da uc uca eklenerek istenilen derinliğe kadar indirilebilmektedir. İnkişaf sırasında hava borusuna kompresörle (Şekil 4.13) hava basılıp, hava borusu ile kolon borusu arasından çamurlu su çıkışı sağlanmıştır.



Şekil 4.13. Kompresör

Kolon borusu yüzeyde ek bir boruya vana konularak bağlanır ve böylece çıkan su bir boru yardımıyla dışarıya verilir (Şekil 4.14).

(a)

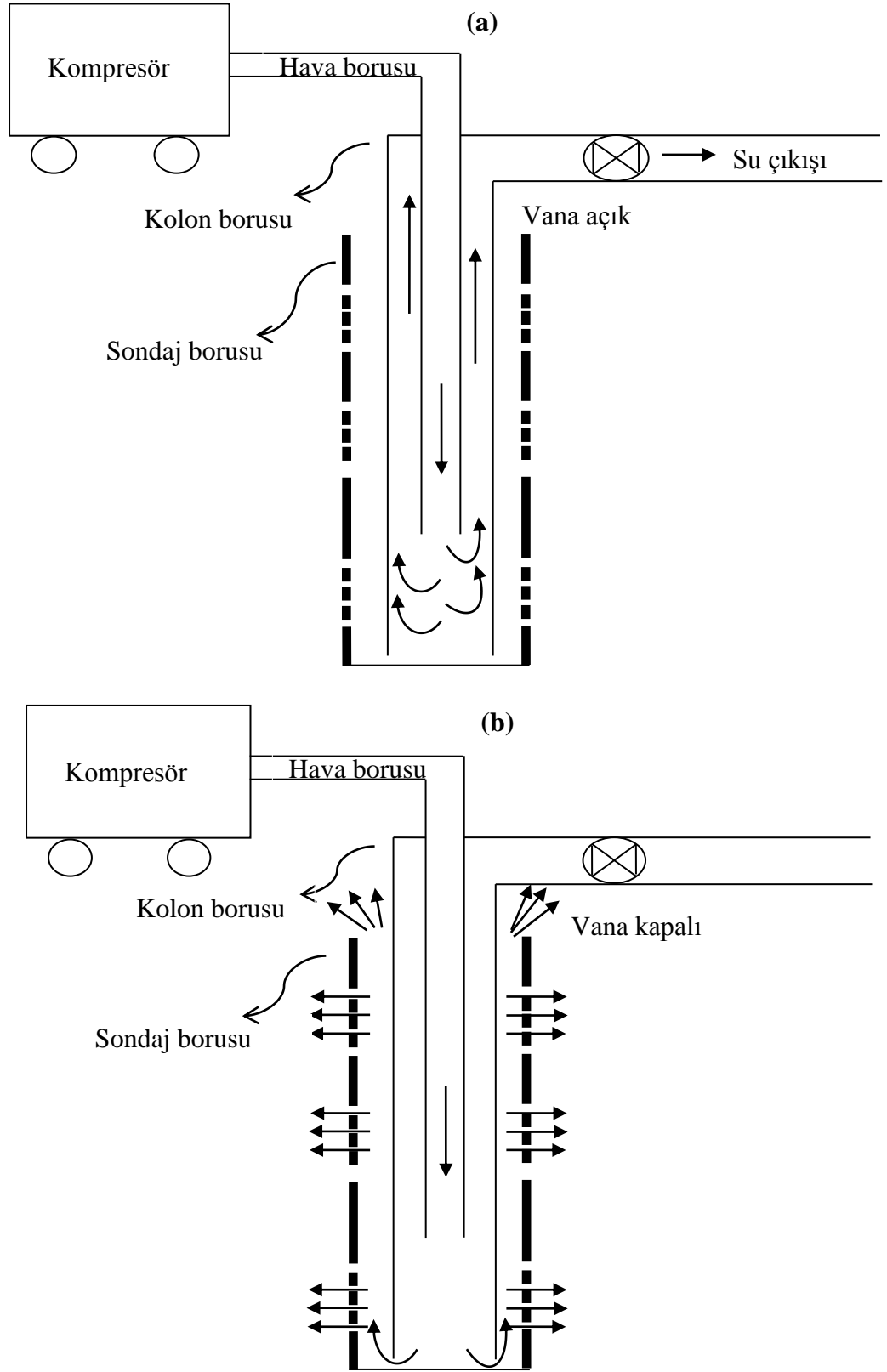


(b)



Şekil 4.14. (a)Kolon borusunun ve hava borusunun kuyuya girişi **(b)**Çıkan çamurlu suyun dışarı verilmesi

Bu işlem vana açık ve kapalı olacak şekilde kuyudan temiz su çıkana kadar tekrarlanır. Vana açıkken (Şekil 4.15a) basınçlı su, hava borusu ile kolon borusu arasından yukarı çıkar. Vana kapalı (Şekil 4.15b) 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 Şekil 4.10b’de görüldüğü gibi büyükten küçüğe dizilir. Sondaj borusunun gideri olmadığından buradan yukarı çıkan basınçlı su Şekil 4.16’da görüldüğü gibi yüzeye püskürür.



Şekil 4.15. İnkişaf sırasında; (a)Vana açık durum (b)Vana kapalı durum



Şekil 4.16. İnkişaf sırasında vana kapalı durumda iken sondaj borusundan basınçlı su çıkışı

Bu temizleme işlemi kuyunun derinliğine ve akiferin malzemesine bağlı olarak değişir. Bu çalışmada, vana kapalı durumda yaklaşık 1 saat ve ardından vana açık durumda yaklaşık yarım saatlik periyodlarla dönüşümlü olarak tekrarlanmış ve kuyudan temiz su gelmeye başladığında sonlandırılmıştır. İnkişaf işlemi bittikten sonra hava boruları ve kolon boruları çıkartılmıştır. Testlere başlamak için inkişaf işleminden sonra, statik seviye oluşana kadar beklenmiştir. Bu süre akiferin geçirgenliğine bağlı olarak değişir. Testler esnasında düşüyü yani statik ve dinamik su seviyeleri arasındaki farkı bulmak için seviye metre kullanılmıştır. Seviye metre; üzerinde uzunluğun yazılı olduğu bir kablo ve ucunda su ile temas ettiğinde sinyal veren bir cihazın bağlı olduğu bir ölçüm aletidir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Seviye metre

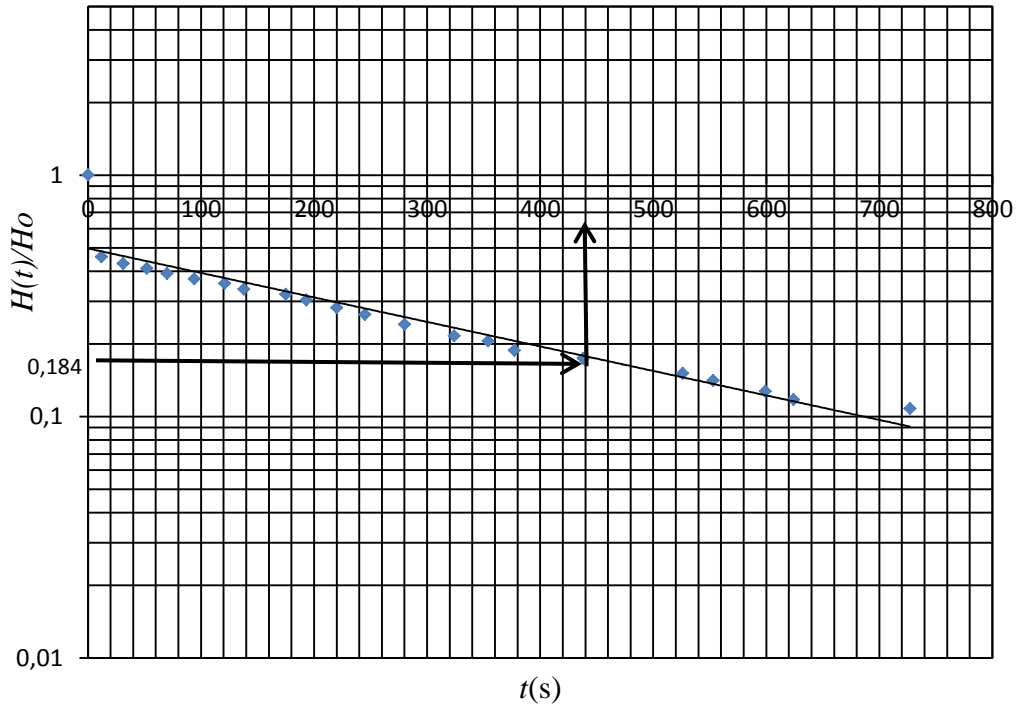
4.1. Analitik Metotların Uygulanması

4.1.1. Slug testler

Slug testler sırasında 7, 10 ve 19 lt olmak üzere 3 farklı hacim kullanılmıştır. Arazide her bir hacim ile inkişaf öncesi 3 ve inkişaf sonrası 3 test yapılmıştır. Alınan test verileri kullanılarak yukarıda 3.1.1. nolu bölümde bahsedilen Bouwer-Rice metodunun işlem adımları ve 3.1.2. nolu bölümdeki Dagan metodunun işlem adımları izlenerek analitik çözümler ile hidrolik iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Aşağıda örnek olarak 30 Ocak 2013 tarihinde inkişaf öncesi 7 lt ile yapılan test için her iki metod ile yapılan analitik çözümlere yer verilmiştir. Arazide yapılan ölçümler sonucu $L_e = 800$ cm, $L_w = 1638$ cm, $r_w = 12,5$ cm, $r_c = 6,6$ cm'dir. Bouwer-Rice metodu için öncelikle logaritmik düşey eksene $H(t)/H_0$ değerleri, aritmetik yatay eksene ise zaman (t) değerleri işaretlenir. İşaretlenen noktalara bir düz çizgi uydurulur (Şekil 4.18). L_e/r_w değerine karşılık gelen Z değeri Şekil 3.2'deki abaktan 3 olarak okunmuştur. Arazide $L_w = D$ olduğundan slug test analitik çözümlerinde denklem (3.4) kullanılarak $\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = 3,669822$ bulunmuştur.

Şekil 4.18’de uydurulan düz çizginin y eksenini kestiği noktadaki değer okunup 0,368 ile çarpılmış 0,184 bulunmuştur. Tekrar Şekil 4.18’de y ekseninden 0,184 değerinin düz çizgiyi kestiği noktadan dikme indirilip x eksenini kestiği noktadaki değer yani $t_{new}=440$ sn olarak belirlenmiş. Denklem (3.5) kullanılarak $K=2,271E-06$ m/sn olarak bulunmuştur.

Dagan metodunda da Bouwer-Rice metodunda olduğu gibi Şekil 4.18 elde edilmiştir. Anizotropik oran $K_z/K_r=1$ kabul edilerek denklem (3.6)’dan $\psi=0,015625$ elde edilmiştir. Çizelge 3.2’nin çalışmamıza uygun olduğu kabulü ile yaklaşık olarak $P=0,26$ olarak alınmıştır. Son olarak denklem (3.7) kullanılarak $K=2,380E-06$ m/sn olarak bulunmuştur. Tüm slug testlerin analitik sonuçlarına ise Çizelge 4.1’de yer verilmiştir.



Şekil 4.18. Slug testlerin analitik çözümü

Çizelge 4.1. Herbir hacim için inkişaf öncesi ve sonrası analitik çözüm sonuçları

Deneyin yapıldığı tarih	İnkişaf durumu	Bırakılan su hacmi (lt)	Statik seviye(m)	Bouwer-Rice Metodu ile $K(m/sn)$	Dagan Metodu ile $K(m/sn)$
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,38	2,271E-06	2,380E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,42	2,221E-06	2,327E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,40	2,379E-06	2,493E-06
15.Oca.13	Yapılmadı	10	16,60	2,276E-06	2,380E-06
15.Oca.13	Yapılmadı	10	16,63	2,178E-06	2,276E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	10	16,32	2,560E-06	2,685E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,56	1,820E-06	1,904E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,62	2,782E-06	2,909E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,36	3,560E-06	3,740E-06
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,44	9,520E-06	9,970E-06
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,41	1,250E-05	1,308E-05
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,43	1,050E-05	1,102E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,41	9,609E-06	1,007E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,41	9,702E-06	1,017E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,42	9,799E-06	1,027E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	1,176E-05	1,232E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	1,110E-05	1,160E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	1,250E-05	1,310E-05

4.1.2. Kademeli pompalama testi

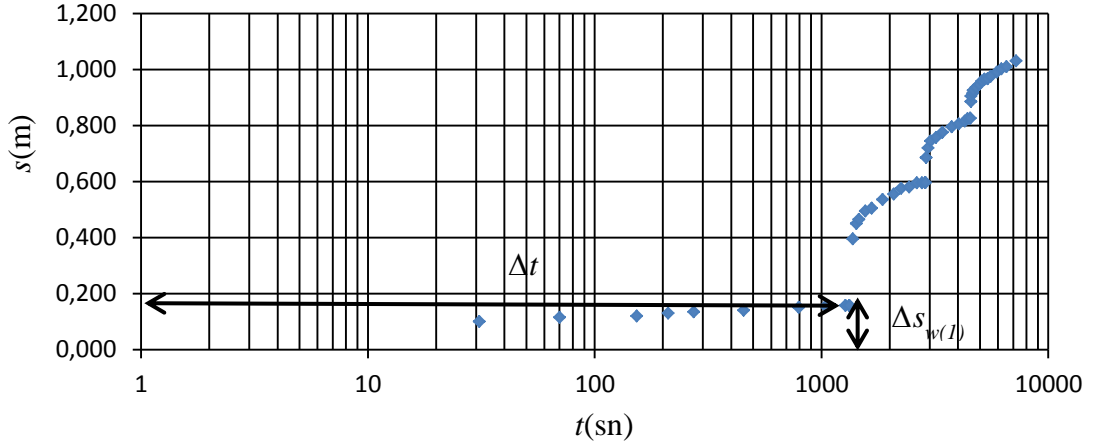
4.1.2.1. Hantush-Bierschenk metodu

Çizelge 4.2’de arazide 2 Kasım 2012 tarihinde kademeli pompalama sonucu elde edilen zamana bağlı düşü değerlerine ve her bir kademedeki debi değerlerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kademeli pompalama testi verileri

	Zaman (sn)	Derinlik (m)	Düşü (m)	Q (m ³ /sn)		Zaman (sn)	Derinlik (m)	Düşü (m)	Q (m ³ /sn)
1.kademe	0	4,595	0,000	0,00017079	3.kademe	2870	5,191	0,596	0,00085393
	31	4,695	0,100			2896	5,280	0,685	
	70	4,710	0,115			2951	5,315	0,720	
	153	4,715	0,120			3030	5,340	0,745	
	211	4,725	0,130			3203	5,352	0,757	
	273	4,730	0,135			3413	5,370	0,775	
	453	4,735	0,140			3749	5,390	0,795	
	793	4,745	0,150			4032	5,400	0,805	
	1043	4,750	0,155			4281	5,411	0,816	
	1275	4,752	0,157			4400	5,418	0,823	
	1324	4,752	0,157			4510	5,421	0,826	
2.kademe	1324	4,752	0,157	0,00065143	4.kademe	4527	5,421	0,826	0,00101786
	1375	4,990	0,395			4551	5,480	0,885	
	1426	5,045	0,450			4560	5,500	0,905	
	1462	5,060	0,465			4646	5,510	0,915	
	1560	5,090	0,495			4657	5,520	0,925	
	1664	5,100	0,505			4807	5,530	0,935	
	1860	5,130	0,535			4964	5,541	0,946	
	2084	5,150	0,555			5092	5,553	0,958	
	2246	5,170	0,575			5231	5,560	0,965	
	2431	5,175	0,580			5391	5,561	0,966	
	2636	5,190	0,595			5578	5,570	0,975	
	2776	5,190	0,595			5937	5,585	0,990	
2863	5,191	0,596		6210	5,597	1,002			
					6530	5,605	1,010		
					7205	5,625	1,030		

Çizelge 4.2’de verilen ölçüm değerleri Şekil 4.19 görüldüğü gibi yarı logaritmik kağıda aktarılmıştır.



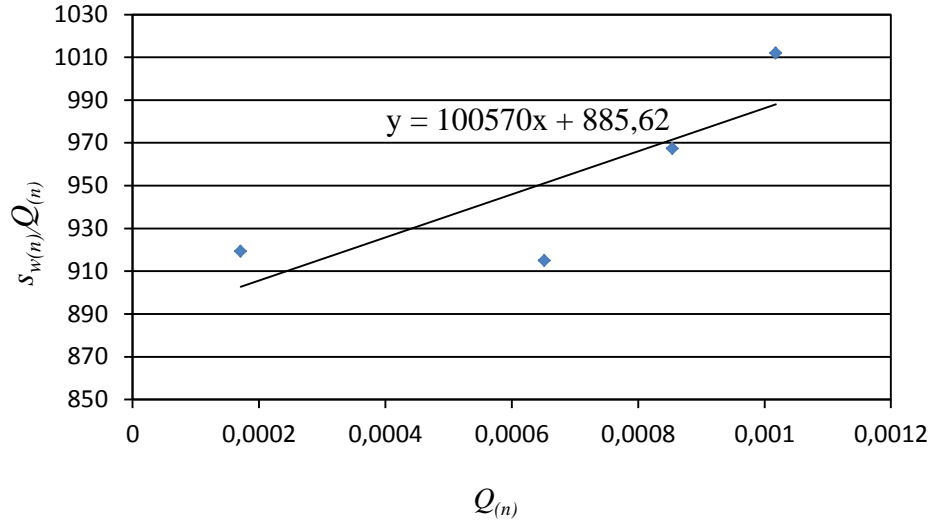
Şekil 4.19. Kademeli pompalama testi analitik çözümü

Her bir kademedeki düşü teker teker belirlenip toplanarak toplam düşü; (3.11)’de belirtildiği üzere $s_{w(n)} = \Delta s_{w(1)} + \Delta s_{w(2)} + \dots + \Delta s_{w(n)}$ şeklinde hesaplanmıştır. Gereken hesaplamalar Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Kademeli pompalama testi

Kademe no	$\Delta s_{w(n)}(m)$	$s_{w(n)}(m)$	$Q_{(n)}(m^3/sn)$	$s_{w(n)}/Q_{(n)}(sn/m^2)$
1	0,157	0,157	0,00017079	919,2763158
2	0,439	0,596	0,00065143	914,9122807
3	0,230	0,826	0,00085393	967,2894737
4	0,204	1,03	0,00101786	1011,929825

Aritmetik kağıdın düşey eksenine $\frac{s_{w(n)}}{Q_n}$ değerleri, yatay eksenine ise Q_n değerleri işaretlenmiştir. Bu noktalardan geçen bir doğru çizilmiştir. Bu doğrunun eğimi $C=100570 \text{ sn}^2/m^5$ ’dir. Doğrunun $\frac{s_{w(n)}}{Q_n}$ eksenini kestiği nokta ise $B=885,62 \text{ sn}/m^2$ ’dir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Hantush-Bierschenk metodu

Denklem (3.8)'de bulunan B ve C değerleri yerine konularak istenilen debi değerindeki düşü miktarı hesaplanabilmektedir (Şekil 4.22). Bulunan eğrinin, arazi ölçümlerini çok düşük bir hata payı ile temsil ettiği görülmüştür.

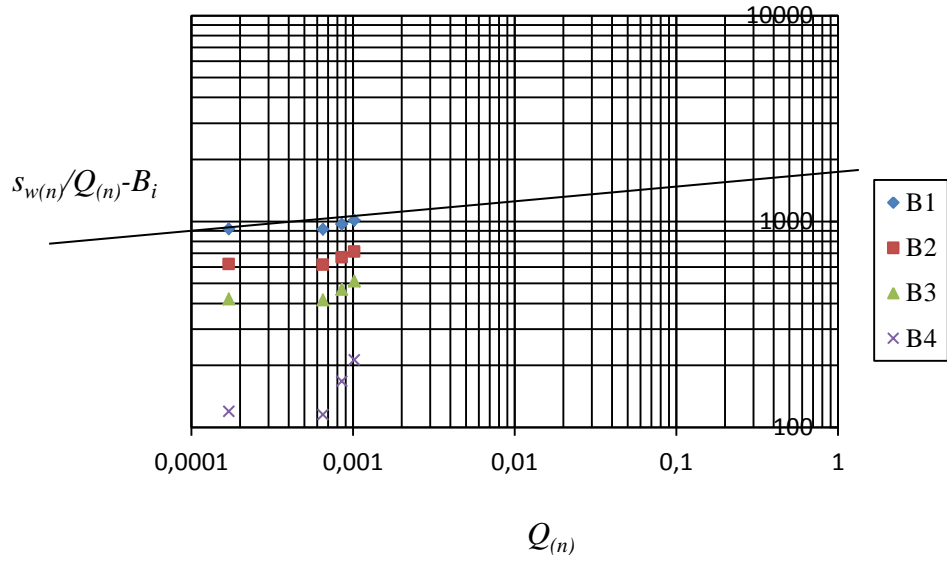
4.1.2.2. Rorabaugh metodu

Hantush-Bierschenk metodundaki gibi yarı logaritmik kağıtta yatay logaritmik eksene zaman, düşey aritmetik eksene ise düşü değerleri aktarılmıştır (Şekil 4.19). Her bir kademedeki düşü teker teker belirlenip, toplam düşü; $s_{w(n)} = \Delta s_{w(1)} + \Delta s_{w(2)} + \dots + \Delta s_{w(n)}$ şeklinde hesaplanarak Çizelge 4.3 oluşturulmuştur. Her kademe için tahmini B_i değerleri seçilip $\left(\frac{s_{w(n)}}{Q_n} - B_i\right)$ değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).

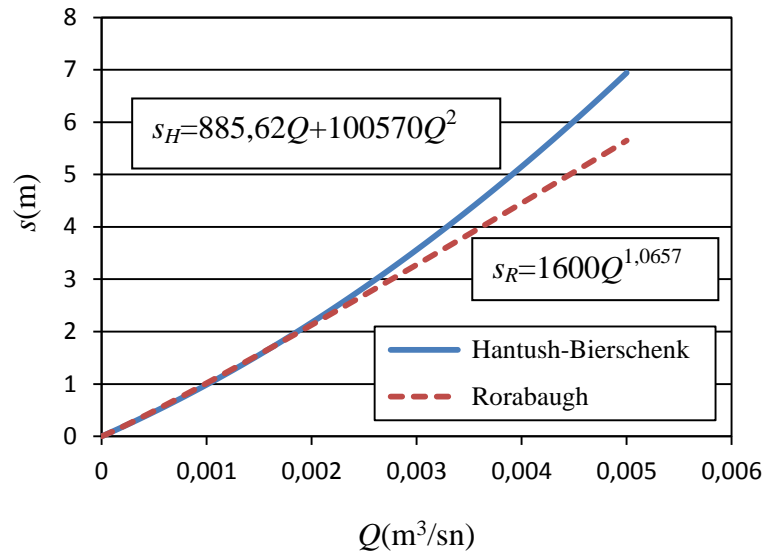
Çizelge 4.4. Rorabaugh metodu

	$B_1(\text{sn/m}^2)$	$B_2(\text{sn/m}^2)$	$B_3(\text{sn/m}^2)$	$B_4(\text{sn/m}^2)$
	0	300	500	800
$s_{w(1)}/Q_{(1)} - B_i$	919,2763158	619,2763158	419,27632	119,276316
$s_{w(2)}/Q_{(2)} - B_i$	914,9122807	614,9122807	414,91228	114,912281
$s_{w(3)}/Q_{(3)} - B_i$	967,2894737	667,2894737	467,28947	167,289474
$s_{w(4)}/Q_{(4)} - B_i$	1011,929825	711,9298246	511,92982	211,929825

Tam logaritmik kağıdın düşey eksenine $\left(\frac{s_w(n)}{Q_n} - B_i\right)$, yatay eksenine ise Q_n değerleri işlenip, farklı B değerleri için bu işlem tekrarlanmıştır. Çıkan eğrilerden lineer olan seçilmiş, bunun eğimi bulunmuş, bulunan eğim $(P-1)$ 'e eşitlenerek $P=1,0657$ bulunmuştur. B değeri ise seçilen eğrinin değeri $B_i=0 \text{ sn/m}^2$ 'dir. $Q_n=1$ eksenine ile seçilen eğri kesiştirilerek kesim noktası belirlenmiştir. $\left(\frac{s_w(n)}{Q_n} - B_i\right)$ 'nin bu değeri ise C 'ye eşittir. $C=1600 \text{ sn}^2/\text{m}^5$ bulunmuştur (Şekil 4.21). Denklem (3.9)'de bulunan B , C ve P değerleri yerine konularak debiyeye karşı düşü eğrisi elde edilmiştir. Analitik olarak elde edilen bu eğri araziden alınan test verilerine oldukça yakındır. Hantush-Bierschenk ve Rorabaugh yöntemleriyle elde edilen debi-düşü eğrileri Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Bu eğriler sayesinde yüksek debilerde düşünün ne kadar olabileceği hakkında tahminde bulunmak mümkün olmaktadır.



Şekil 4.21. Rorabaugh metodu



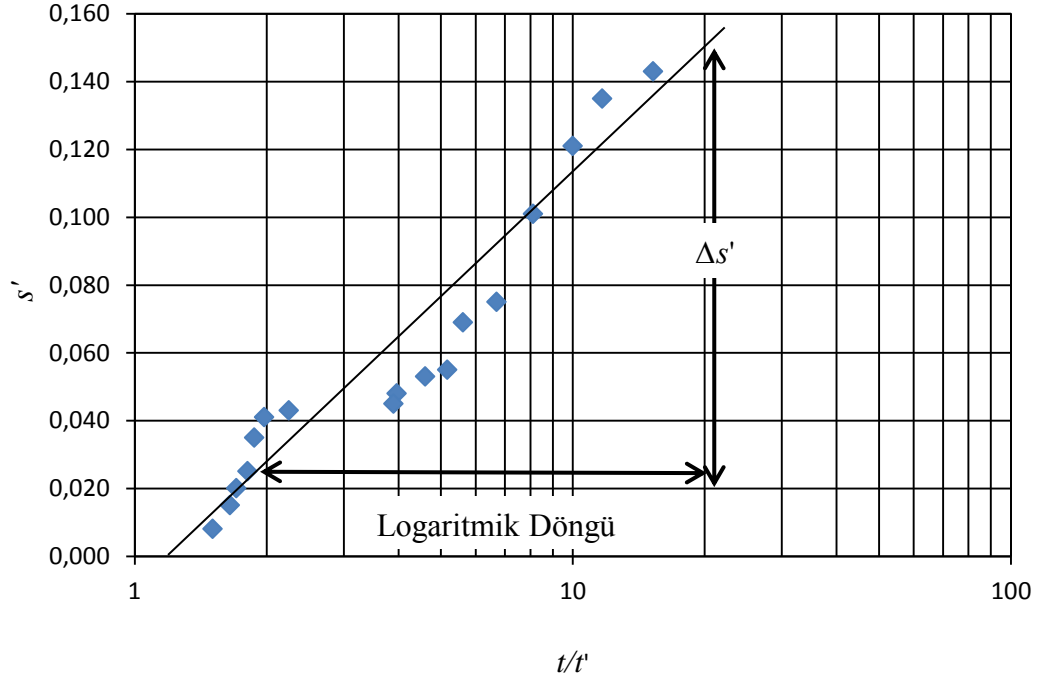
Şekil 4.22. 1.kuyu için debi-düşü grafiği

4.1.3. Geri dönüm testi

17 Şubat 2013 tarihinde 1. kuyuda pompalama testi sonrasında geri dönüm testi yapılmıştır (Şekil 4.27d). Çizelge 4.5’de pompalama durdurulduktan sonraki geri dönüm testinde elde edilen verilere yer verilmiştir. Şekil 4.23’de bu değerler kullanılarak $s'-t/t'$ verileri yarı logaritmik grafiğe aktarılmıştır. Bir logaritmik döngü için kalacak şekilde çizilen doğrunun eğimi kullanılarak ve denklem (3.22)’den faydalanılarak $T=4,63E-04$ m²/sn olarak hesaplanmıştır. Akifer kalınlığına bölünerek $K=1,96E-05$ m/sn olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. 17 Şubat 2013 tarihli geri dönüm testi verileri

s' (m)	t' (sn)Pompajın durdurulmasından itibaren geçen süre	t (sn)Pompajın başlamasından itibaren geçen süre	t/t'	Bilgi
0,265	0	855		Pompaj durduruldu.
0,143	60	915	15,250	Geri dönüm periyoduna başlandı. Pompalama esnasındaki debi 3,16E-04 m ³ /sn'dir.
0,135	80	935	11,688	
0,121	95	950	10,000	
0,101	120	975	8,125	
0,075	150	1005	6,700	
0,069	185	1040	5,622	
0,055	205	1060	5,171	
0,053	237	1092	4,608	
0,048	288	1143	3,969	
0,045	295	1150	3,898	
0,043	685	1540	2,248	
0,041	875	1730	1,977	
0,035	975	1830	1,877	
0,025	1055	1910	1,810	
0,020	1210	2065	1,707	
0,015	1315	2170	1,650	
0,008	1685	2540	1,507	



Şekil 4.23. Geri dönüş testi

4.1.4. Çoklu pompaj testi

Pompalama deneylerinin yapıldığı kuyuda her test sonunda sistemin eski haline gelmesini bekleyerek farklı debiler ile 5 adet pompalama testi yapılmıştır. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'deki veriler kullanılarak Şekil 4.24 elde edilmiştir.

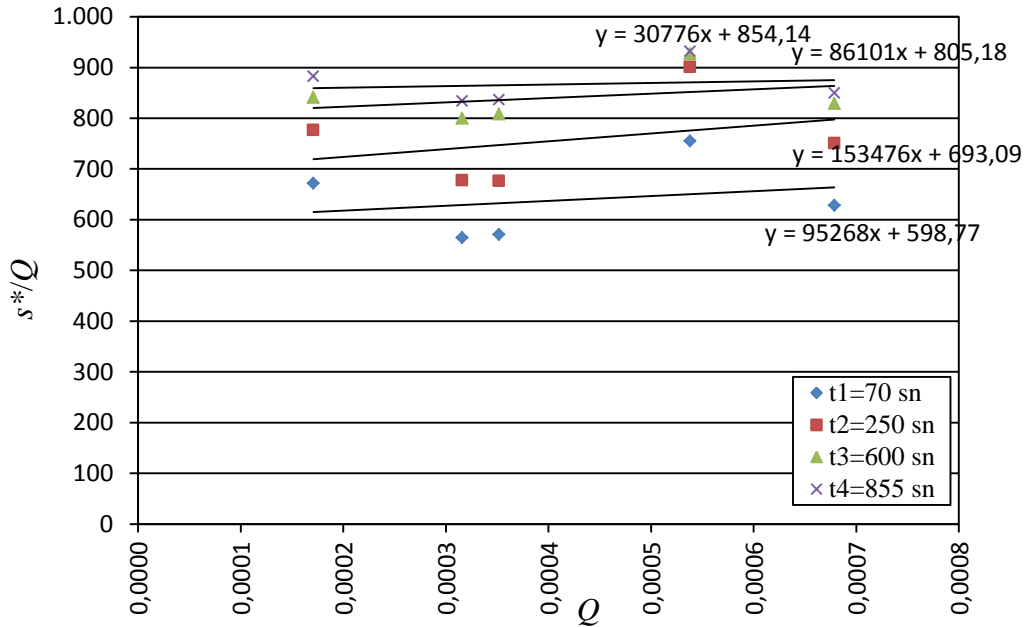
Çizelge 4.6. Arazi pompalama deneyleri verileri

1. pompalama deneyi				
Zaman(sn)	Düşü(m)	Düzeltilmiş düşü(s^*)	$Q_1(m^3/sn)$	Başlangıçtaki hidrolik yük(m)
70	0,43	0,42601509	6,79E-04	23,2
250	0,515	0,50928394		
600	0,56938	0,56239307		
855	0,584	0,57664966		
2. pompalama deneyi				
Zaman(sn)	Düşü(m)	Düzeltilmiş düşü(s^*)	$Q_2(m^3/sn)$	Başlangıçtaki hidrolik yük(m)
70	0,41	0,40624777	5,38E-04	22,4
250	0,49	0,48464063		
600	0,504	0,49833		
855	0,507	0,5012623		
3. pompalama deneyi				
Zaman(sn)	Düşü(m)	Düzeltilmiş düşü(s^*)	$Q_3(m^3/sn)$	Başlangıçtaki hidrolik yük(m)
70	0,2017	0,20083771	3,52E-04	23,59
250	0,239	0,2377893		
600	0,286	0,2842663		
855	0,296	0,29414294		
4. pompalama deneyi				
Zaman(sn)	Düşü(m)	Düzeltilmiş düşü(s^*)	$Q_4(m^3/sn)$	Başlangıçtaki hidrolik yük(m)
70	0,179	0,17832217	3,16E-04	23,635
250	0,215	0,21402211		
600	0,254	0,25263516		
855	0,265	0,26351439		
5.pompalama deneyi				
Zaman(sn)	Düşü(m)	Düzeltilmiş düşü(s^*)	$Q_5(m^3/sn)$	Başlangıçtaki hidrolik yük(m)
70	0,115	0,11470486	1,71E-04	22,405
250	0,133	0,13260524		
600	0,144	0,14353725		
855	0,15124	0,15072954		

Çizelge 4.7. Çoklu pompaj testi için her bir t zamanındaki s_n^*/Q_n 'e karşılık Q_n değerleri

		Q_1 (m3/sn)	Q_2 (m3/sn)	Q_3 (m3/sn)	Q_4 (m3/sn)	Q_5 (m3/sn)
		6,79E-04	5,38E-04	3,52E-04	3,16E-04	1,71E-04
t_1	s_1^*/Q_n	6,28E+02	7,55E+02	5,71E+02	5,64E+02	6,72E+02
t_2	s_2^*/Q_n	7,51E+02	9,01E+02	6,76E+02	6,77E+02	7,76E+02
t_3	s_3^*/Q_n	8,29E+02	9,26E+02	8,08E+02	7,99E+02	8,40E+02
t_4	s_4^*/Q_n	8,50E+02	9,32E+02	8,36E+02	8,34E+02	8,83E+02

Aritmetik kağıda s_n^*/Q_n karşılık Q_n değerleri aktarılmıştır. Bu değerlere bir doğru oturtulmuştur. Herbir zaman için bir düz çizgi elde edilip, bu doğruların s_n^*/Q_n eksenini kestiği nokta A , doğruların eğimi ise C olduğundan, Şekil 4.24'ten $A_1=598,77$ sn/m², $A_2=693,09$ sn/m², $A_3=805,18$ sn/m², $A_4=854,14$ sn/m², $C_1=95268$ sn²/m⁵, $C_2=153476$ sn²/m⁵, $C_3=86101$ sn²/m⁵, $C_4=30776$ sn²/m⁵ olarak okunur. Birbirine en yakın C değerleri için A ve t çifti seçilip, (3.35) nolu eşitlik kullanılarak $T=0,000827$ m²/sn olarak elde edilmiştir. Bu değer akiferin doygun kalınlığa bölünerek $K=3,60E-05$ m/sn olarak bulunmuştur.



Şekil 4.24. Çoklu pompaj testi

4.2. Sayısal Modelleme

4.2.1. Slug testler için sayısal çözüm

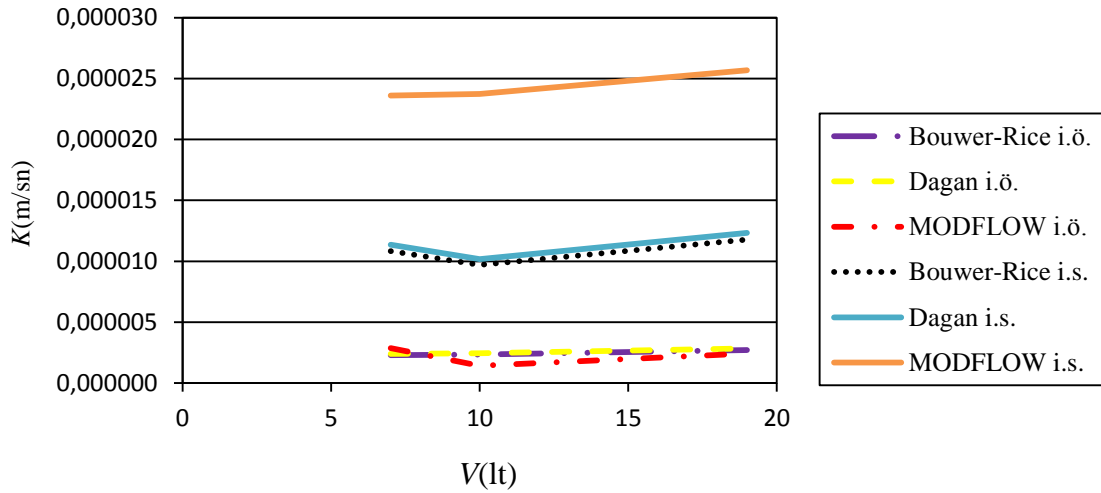
Sayısal modelleme için MODFLOW (McDonald ve Harbaugh 1988) kullanılmıştır. MODFLOW, U.S. Geological Survey'in modüler üç-boyutlu sonlu farklar yeraltısuyu modeli olup son yıllarda kullanımı giderek artmıştır. MODFLOW, yeraltısuyu akımı kısmi diferansiyel denklemlerini sonlu farklar metoduyla çözen bir programdır. Bu çalışmada MODFLOW çözüm ağında 200 sütun, 200 satır olmak üzere toplam 40000 aktif hücre oluşturulmuştur. Herbir hücrenin alanı 0,117m x 0,117m olarak tanımlanmıştır. Bu alan arazide açılan kuyunun yüzey alanına eşittir. Akifer basınçsız, derinliği 20 m ve akım kararsız olarak tanımlanmıştır. Programda her stress periyodunun başlangıcında zaman aralığı (Δt) dar, ilerleyen zamanlarda ise geniş tanımlanmıştır. Bunun amacı, stress periyodunun başlangıcında hidrolik yükteki değişimi yakalayabilmektir. Kuyuya su kütlelerinin 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. Akifer çok ince kum-silt malzemeye sahip olduğundan, kuyunun tanımlandığı hücre dışında her yerde özgül verim $S_y=0,1$ alınmıştır. Kuyuda ise, su basıldığında arazideki yükselmenin aynısını elde edebilmek için, $S_y=1$ alınmıştır. Ayrıca denemeler sonucunda özgül verimin sonuçları çok etkilemediği kanısına varılmıştır. Modellemede zaman birimi saniye, uzunluk birimi metre, debi birimi ise m^3/sn olarak çalışılmıştır. 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 kuyudan yaklaşık 11,7 m'lik bir mesafenin simülasyon süresi içinde geçirimsiz sınırlardan etkilenmeyecek kadar geniş bir akiferi temsil ettiği görülmüştür. Ortam homojen olarak düşünülerek tek bir hidrolik iletkenlik bölgesi tanımlanmıştır. Çalışılan kuyuda ölçülen hidrolik yük değerleri gözlem verisi olarak tanımlanmış ve *Parameter Estimation* seçeneği kullanılarak ortamın bilinmeyen hidrolik iletkenlik değeri program tarafından bulunmaya çalışılmıştır. MODFLOW simülasyon esnasında hidrolik iletkenlik değerlerini önceden tanımlanmış sınırlar arasında değiştirerek simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile

gözlemlenen değerler arasındaki farkı en aza indirmeye çalışarak en uygun hidrolik iletkenlik değerini hesaplamaktadır. Çizelge 4.8’de bulunan hidrolik iletkenlik değerlerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.8. Herbir hacim için inkişaf öncesi ve sonrası MODFLOW sonuçları

Deneyin yapıldığı tarih	İnkişaf durumu	Bırakılan su hacmi (lt)	Statik seviye(m)	MODFLOW ile $K(m/sn)$
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,38	2,770E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,42	3,440E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	7	16,40	2,380E-06
15.Oca.13	Yapılmadı	10	16,60	1,090E-06
15.Oca.13	Yapılmadı	10	16,63	1,340E-06
30.Oca.13	Yapılmadı	10	16,32	1,850E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,56	1,940E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,62	2,080E-06
17.Oca.13	Yapılmadı	19	16,36	3,220E-06
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,44	2,290E-05
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,41	2,250E-05
17.Şub.13	Yapıldı	7	16,43	2,540E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,41	2,080E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,41	2,110E-05
17.Şub.13	Yapıldı	10	16,42	2,930E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	2,050E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	2,380E-05
17.Şub.13	Yapıldı	19	16,45	3,270E-05

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.8’de slug testlerde inkişaf öncesi ve sonrası analitik ve MODFLOW çözümlerinin her hacim için aritmetik ortalamaları alınmış ve hacimlere karşılık hidrolik iletkenlik değerleri Şekil 4.25’te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. İnkişaf öncesi ve sonrası 7, 10 ve 19 lt için analitik ve MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması (i.ö.:inkişaf öncesi, i.s.:inkişaf sonrası)

4.2.2. Pompalama testleri ve kademeli pompalama testi için sayısal çözüm

Sayısal modelleme için MODFLOW (McDonald ve Harbaugh 1988) kullanılmıştır. MODFLOW Grid ağında 200 sütun, 200 satır mevcut olup toplam 40000 aktif hücre bulunmaktadır. Akifer basınçsız, derinliği 27 m ve akım kararsız olarak tanımlanmıştır. Bu testler için modellemede **3 farklı durum** düşünülmüştür. Bunlar;

1. Öncelikle her bir hücre 1m x 1m’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.
2. Araziye açılan kuyunun yüzey alanına eşit olması için her bir hücrenin alanı 0,117m x 0,117m olarak tanımlanmış ve özgül verim her yerde $S_Y=0,1$ olarak alınmıştır.

3. Arazide açılan kuyunun yüzey alanına eşit olması için herbir hücrenin alanı 0,117m x 0,117m olarak tanımlanmış ve kuyunun tanımlandığı hücre dışında her yerde özgül verim $S_Y=0,1$ alınmıştır. Kuyuda ise, su çekildiğinde arazideki alçalmanın aynısını yansıtabilmek amacıyla, $S_Y=1$ alınmıştır.

Programda her stress periyodunun başlangıcında zaman aralığı (Δt) dar, ilerleyen zamanlarda ise geniş tanımlanmıştır. Bunun amacı, stress periyodunun başlangıcında hidrolik yükteki değişimi yakalayabilmektir. Kuyuda MODFLOW'un well paketiyle, herbir kademe için çekilen miktar kadar negatif debi değeri tanımlanmıştır. Sonsuz akifer durumunu temsil etmek için akifer yatay düzlemde yeterince geniş alınmıştır. Ortam homojen olarak düşünülerek tek bir hidrolik iletkenlik bölgesi tanımlanmıştır. Çalışılan kuyuda ölçülen hidrolik yük değerleri gözlem verisi olarak tanımlanmış ve *Parameter Estimation* seçeneği kullanılarak ortamın bilinmeyen hidrolik iletkenlik değeri program tarafından bulunmaya çalışılmıştır. MODFLOW simülasyon esnasında hidrolik iletkenlik değerlerini önceden tanımlanmış sınırlar arasında değiştirerek simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile gözlemlenen değerler arasındaki farkı en aza indirmeye çalışarak en uygun hidrolik iletkenlik değerini hesaplamaktadır. Arazide yapılan tüm pompalama deneylerinin sayısal çözümlerine Çizelge 4.9'da ve Çizelge 4.10'da yer verilmiştir.

Çizelge 4.9. Kademeli pompalama deneyinin 3 farklı durum için MODFLOW sonucu

Durum	Deney tarihi	Herbir hücre alanı	S_Y	MODFLOW ile $K(m/sn)$	MODFLOW AFKT
Durum 1	2 Kasım 2012	1 x 1 m ²	her yerde $S_Y=0,1$	2,52E-05	0,2510
Durum 2	2 Kasım 2012	0,117 x 0,117 m ²	her yerde $S_Y=0,1$	4,22E-05	0,1050
Durum 3	2 Kasım 2012	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer her yerde $S_Y=0,1$	4,20E-05	0,0944

Çizelge 4.10. Pompalama deneylerinin 3 farklı durum için MODFLOW sonuçları

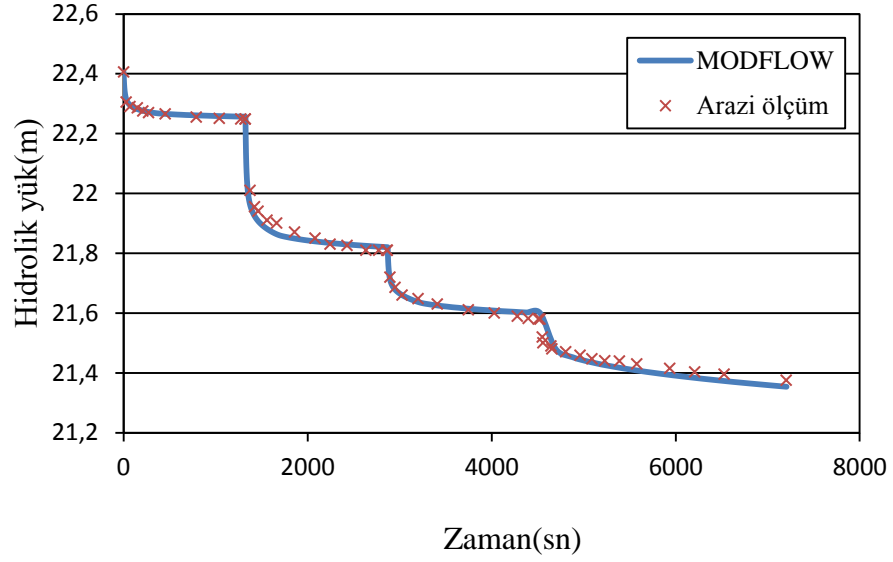
Durum	Deney tarihi	$Q(m^3/sn)$	Herbir hücre alanı	S_Y	MODFLOW ile $K(m/sn)$	MODFLOW AFKT
Durum 1	7 Şubat 2013	6,79E-04	1 x 1 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	2,05E-05	0,8860
Durum 2	7 Şubat 2013	6,79E-04	0,117 x 0,117 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	4,07E-05	0,4500
Durum 3	7 Şubat 2013	6,79E-04	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer heryerde $S_Y=0,1$	3,99E-05	0,1900
Durum 1	31 Ekim 2012	5,38E-04	1 x 1 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	1,78E-05	0,5560
Durum 2	31 Ekim 2012	5,38E-04	0,117 x 0,117 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	3,72E-05	0,0232
Durum 3	31 Ekim 2012	5,38E-04	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer heryerde $S_Y=0,1$	3,61E-05	0,0215
Durum 1	21 Şubat 2013	3,52E-04	1 x 1 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	2,06E-05	0,1170
Durum 2	21 Şubat 2013	3,52E-04	0,117 x 0,117 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	4,61E-05	0,0330
Durum 3	21 Şubat 2013	3,52E-04	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer heryerde $S_Y=0,1$	4,46E-05	0,0175
Durum 1	17 Şubat 2013	3,16E-04	1 x 1 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	2,21E-05	0,1070

Çizelge 4.10. Pompalama deneylerinin 3 farklı durum için MODFLOW sonuçları (devam)

Durum	Deney tarihi	$Q(m^3/sn)$	Herbir hücre alanı	S_Y	MODFLOW ile $K(m/sn)$	MODFLOW AFKT
Durum 2	17 Şubat 2013	3,16E-04	0,117 x 0,117 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	4,33E-05	0,1390
Durum 3	17 Şubat 2013	3,16E-04	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer heryerde $S_Y=0,1$	4,10E-05	0,1030
Durum 1	2 Kasım 2012	1,71E-04	1 x 1 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	2,01E-05	0,0258
Durum 2	2 Kasım 2012	1,71E-04	0,117 x 0,117 m ²	heryerde $S_Y=0,1$	4,13E-05	0,000594
Durum 3	2 Kasım 2012	1,71E-04	0,117 x 0,117 m ²	Kuyuda $S_Y=1$, diğer heryerde $S_Y=0,1$	4,06E-05	0,000537

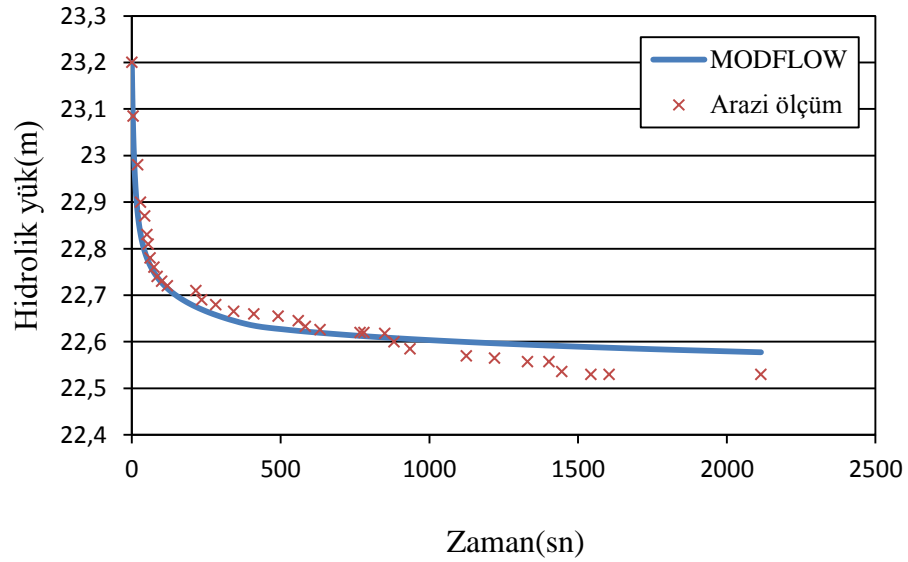
Yapılan herbir pompalama deneylerinin sayısal modellemesinden durum 2 ve durum 3'deki modellemelerde hidrolik iletkenliklerin Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da görüldüğü üzere oldukça yakın olduğu söylenebilir. Buradan özgül verimin (S_Y) sonuçları çok fazla etkilemediği kanısına varılmaktadır. Durum 1'deki modelleme sonuçlarının diğerlerinden farkının grid çözünürlüğünden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.10'dan debinin simülasyon sonucu bulunan hidrolik iletkenlik değerlerini etkilemediği görülmüştür. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da görüldüğü üzere yapılan modellemelerde arazi verileri ile simülasyon sonuçları arasındaki en düşük hatayı (AFKT:Ağırlıklı farkların kareleri toplamı) durum 3 vermiştir. Bu nedenle durum 3'ün yani herbir hücrenin alanı 0,117m x 0,117m olarak alınıp, kuyunun tanımlandığı hücre dışında heryerde $S_Y=0,1$ ve kuyuda $S_Y=1$ olan durumun arazideki durumu en iyi yansıttığı düşünülmektedir. Kademeli pompalama ve pompalama testlerinin durum 3

için simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile arazide gözlemlenen ölçüm değerlerinin karşılaştırılmasına Şekil 4.26, Şekil 4.27’de yer verilmiştir.

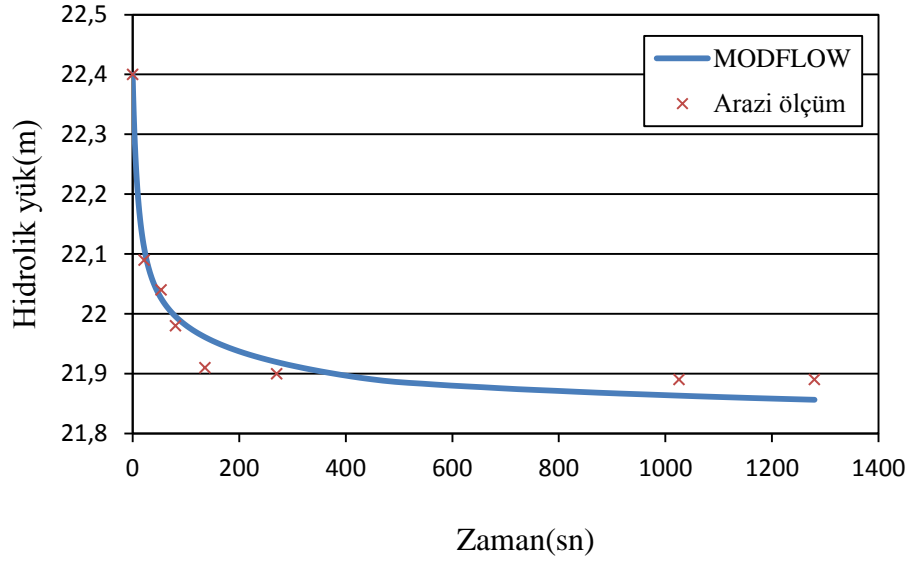


Şekil 4.26. 2 Kasım 2012 kademeli pompalama deneyi ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümünün karşılaştırılması

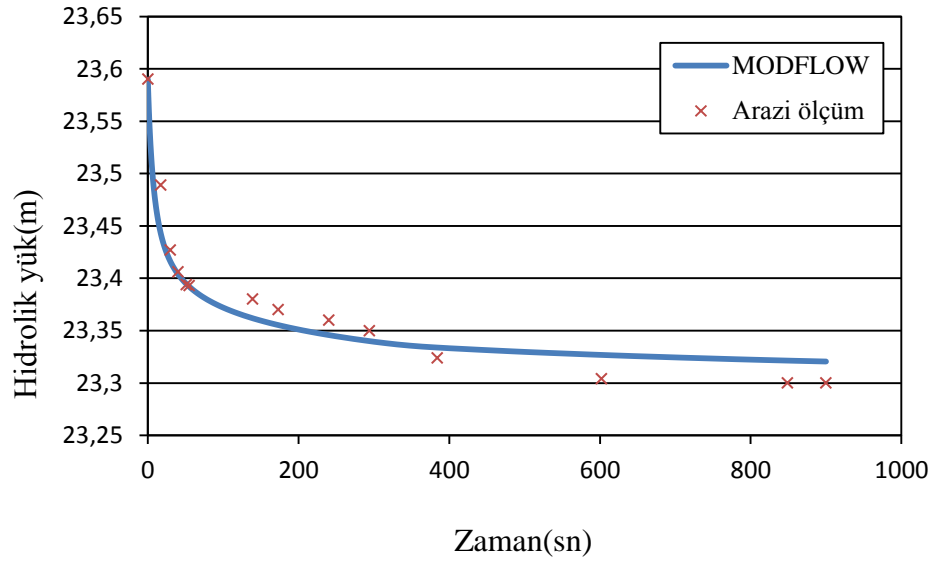
(a)

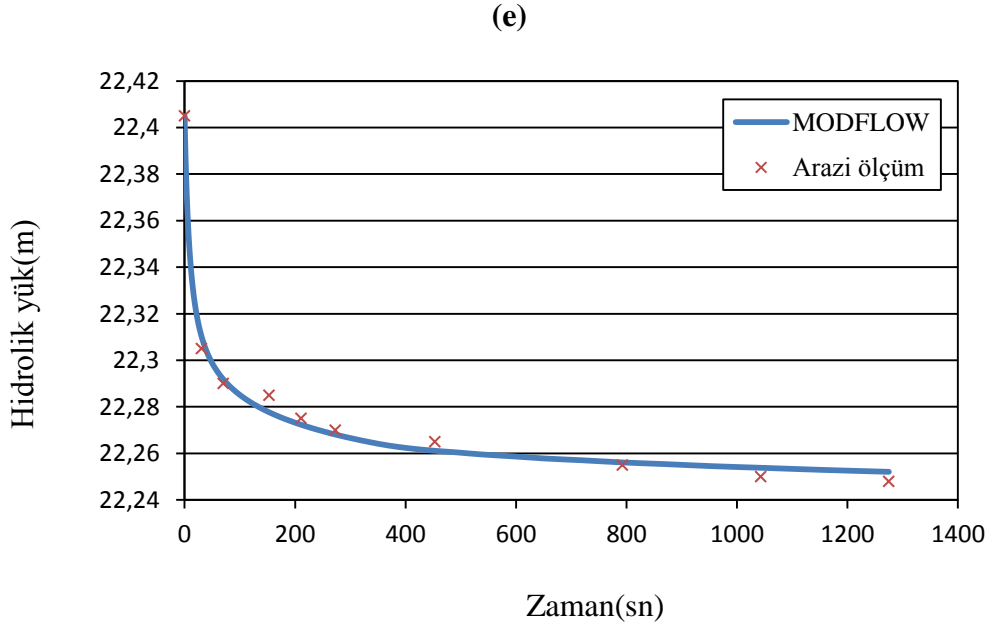
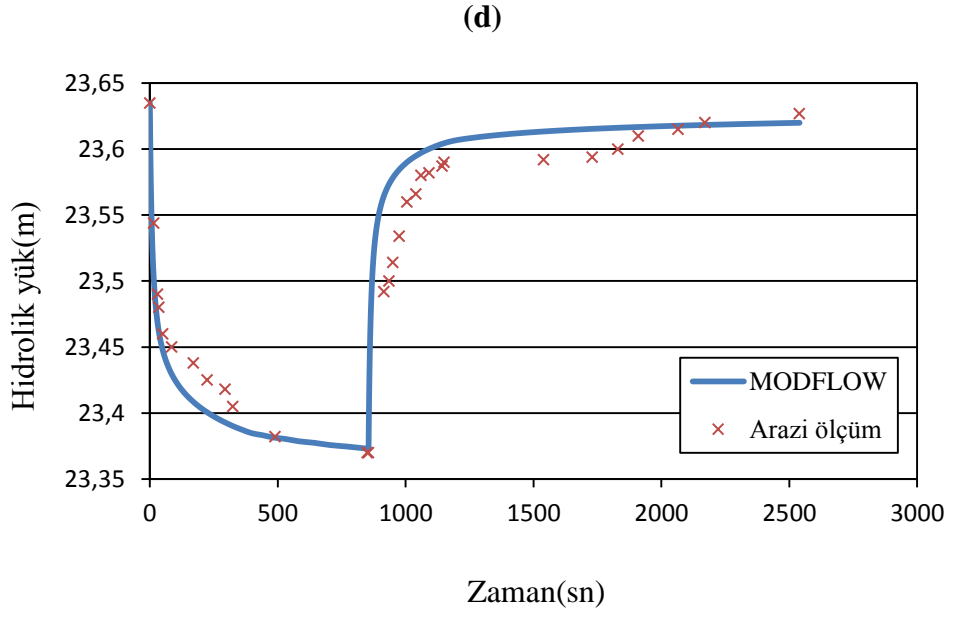


(b)



(c)





Şekil 4.27. Pompalama deneyleri ölçüm değerleri ile MODFLOW çözümlerinin karşılaştırılması **(a)**7 Şubat 2013 **(b)**31 Ekim 2012 **(c)**21 Şubat 2013 **(d)**17 Şubat 2013 (geri dönüş testi ile birlikte) **(e)**2 Kasım 2012

5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Şekil 4.25’de görüldüğü üzere yapılan slug testlerde gerek analitik yöntemle gerekse sayısal yöntemle bulunan sonuçlar inkişaf öncesinde kuyu civarı hidrolik iletkenliğinin daha düşük olduğunu göstermektedir. İnkişaf sonrasında ise hidrolik iletkenlik değeri daha yüksek bulunmaktadır. İnkişafın kuyu performansını belirgin bir şekilde arttırdığı ve kullanılan hacmin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Çizelge 5.1’de yapılmış olan tüm testler için hesaplanan hidrolik iletkenlik değerlerine yer verilmiştir. Arazide birden fazla yapılmış olan testlerin, gerek analitik gerekse sayısal yöntemle bulunan sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır.

Çizelge 5.1. Kuyu testlerine dayalı analitik ve sayısal yöntemlerle bulunan hidrolik iletkenlik değerleri

Kuyular	Testin adı	Analitik yöntem $K(m/sn)$		Sayısal yöntem $K(m/sn)$ (durum 3)
2		Bouwer-Rice metodu	Dagan metodu	
	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	Çoklu pompaj testi	3,60E-05		4,04E-05
1	Kademeli pompalama testi	-		4,20E-05

Arazide yapılan kademeli pompalama testi sonucunda Şekil 4.22’de farklı debiler için kuyuda oluşabilecek tahmini düşü miktarına yer verilmiştir.

Yapılan pompalama testlerine uygulanan analitik yöntemlerle hidrolik iletkenlik değerine ulaşılmıştır. 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 5.1).

Yapılan herbir pompalama testi için sayısal modelleme de yapılmıştır. Çizelge 4.9'da ve Çizelge 4.10'da yapılan tüm modelleme sonuçlarına yer verilmiştir. Özgül verimin sonuçları çok fazla etkilemediği, modelleme sonuçları arasındaki farklılığın grid çözünürlüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan modellemelerde arazi verileri ile simülasyon sonuçları arasındaki en düşük hatayı durum 3 vermiştir. Bu nedenle herbir hücrenin alanı 0,117m x 0,117m, kuyunun tanımlandığı hücre dışında her yerde $S_y=0,1$ ve kuyuda $S_y=1$ alındığı zaman arazideki durumun en iyi şekilde temsil edildiği düşünülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.10'da görüldüğü üzere debinin simülasyon sonucu bulunan hidrolik iletkenlik değerlerini etkilemediği kanısına varılmıştır.

Pompalama testlerinin arazi durumunu en iyi yansıtan modeli için (durum 3) simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile arazide gözlemlenen ölçüm değerlerinin karşılaştırmasına Şekil 4.26'da ve Şekil 4.27'de yer verilmiştir. MODFLOW'da oluşturulan model arazi durumunu ne kadar iyi yansıtırsa simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile arazide alınan ölçüm değerleri birbirine o kadar yakın olacaktır. Bu çalışmada, simülasyon sonucu elde edilen hidrolik yük değerleri ile arazide alınan ölçüm değerleri arasındaki farklar düşüktür. Bundan dolayı, sayısal modelin arazideki durumu başarılı bir biçimde temsil ettiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada yapılan modellemelerde, sadece hidrolik iletkenlik değeri parametre tahmini ile bulunmuştur. Özgül verim ise zemin cinsi göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bulunmaya çalışılan parametre sayısı arttıkça simülasyon sayısı ve simülasyon süresi de artacaktır. Bu nedenle çalışılan arazinin durumu mümkün olduğunca net olarak belirlenip buna bağlı olarak bilinmeyen parametre sayısının düşük tutulması simülasyon

süresinin kısalmasını sağlayacaktır. Özellikle heterojen sistemlerde akiferin daha geniş bir alanı hakkında bilgi edinebilmek için akifer testlerinin tek bir kuyu yerine birden fazla kuyuda yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications, New York, USA, 764 pp.

Bierschenk, W. H. 1963. Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. International Association of Scientific Hydrology, 64:493-507.

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*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.

Bouwer, H. 1989. Estimating and enhancing groundwater recharge. In: Sharma ML (ed) Groundwater Recharge. Balkema, Rotterdam, pp 1–10.

Butler, J.J., Jr. 1998. The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests. Lewis Publishers, New York, 252p.

Cooper, H.H., Jacob C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 27, pp. 526-534.

Dagan, G. 1978. A note on packer, slug, and recovery tests in unconfined aquifers, *Water Resources Research*, vol. 14, no. 5. pp. 929-934.

Darcy, H. 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, V. Dalmont, Paris.

Dupuit, J. 1863. Etude théorique et pratique sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2nd ed. Paris, France: Dunod.

Eden, R. N., Hazel C. P. 1973. Computer and graphical analysis of variable discharge pumping tests of wells. *Civil Engineering Trans., Inst. Engrs., Australia*. pp. 5-10.

Hantush, M.S. 1964. Hydraulics of wells, in: Advances in Hydroscience, V.T. Chow (editor), *Academic Press*, New York, pp. 281-442.

Hvorslev, M.J. 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.

Jacob, C.E. 1946. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Proc.Am.Soc.Civil Engrs.* v.79,no.5

Jacob, C.E. 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions ASCE.* V.112, pp. 1047-1070.

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, 370p.

Lennox, D.H. 1966. Analysis and application of step-drawdown tests. *Journal of Hydraulics Div., ASCE.* Hy. 6, pp.25-47.

Mays,L.W. 2011. Ground and Surface Water Hydrology. Wiley, 617p.

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.

Nahm,G.Y. 1980. Estimating transmissivity and well loss constant using multirate test data from a pumped well. *Ground Water*, Vol.18, No.3: 281-285.

Neuman, S.P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table. *Water Resources Research*, vol. 8, no. 4, pp. 1031-1045.

Papadopulos, S.S., Bredehoeft, J.D., Cooper Jr., H.H. 1973. On the analysis of 'slug test' data. *Water Resour. Res.*, 9(4), 1087–1089.

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.

Sheahan, N.T. 1971. Type-curve solution of step-drawdown test. *Ground Water*. v. 9, pp.25-29.

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.*, vol. 16, pp. 519-524.

Thiem, G. 1906. *Hydrologische Methoden*. Leipzig, Germany: Gebhardt.

Zlotnik, V. 1994. Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers. *Ground Water*, vol. 32, no. 5, pp. 761-766.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : GÖKÇEN ERYILMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA, 1987
Yabancı Dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu:

Lise : BURSA KIZ LİSESİ, 2005
Lisans : BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ, 2009

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

MİMAK YAPI DENETİM 2009-KONTROL MÜHENDİSİ

BAYBURT ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ 2010-ARAŞTIRMA GÖREVLİSİ

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ 2012-ARAŞTIRMA GÖREVLİSİ

İletişim (e-posta) : geryilmaz@uludag.edu.tr