

166649

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUSAL OLMAYAN YERALTI SU
AKIMLARININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Abdüsselam ALTUNKAYNAK
(501002151)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2005

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Zekai ŞEN 
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. İstemi ÜNSAL 
Prof.Dr. Cem AVCI (B.Ü.) 
Prof.Dr. Reha ARTAN 
Doç.Dr. M. Emin BİRPINAR (Y.T.Ü) 

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Günümüzde, küresel ısınmanın su kaynaklarına olan olumsuz etkileri daha net hissedilmekte ve buna paralel olarak yeryüzünde buzullardan sonra en büyük tatlı su potansiyeline sahip olan yeraltı su kaynaklarının önemi daha da artmaktadır. Gerek kullanım ve gerekse maliyet bakımından yeraltı suyunun kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. Bu nedenle mevcut yeraltı su kaynaklarının korunması ve optimum işletimi için yeni yöntem ve teknolojiler geliştirilmelidir.

Bu çalışmada, yeraltı suyunun daha etkin kullanımı için literatürde mevcut olan kabullerin dışında yeni bir bakış açısı ile çözümler türetilmiştir.

Çalışmalarım boyunca değerli vaktini bana ayırıp, benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, zorlandığım her noktada verdiği destek ve yol göstericiliği ile çözüme ulaşmamı sağlayan saygıdeğer Zekai ŞEN hocama en içten hürmet ve şükranlarımı sunarım.

Engin birikim ve tecrübeleriyle, güzel bir eserin ortaya çıkması için katkılarını benden esirgemeyen sayın Prof. Dr. İstemi ÜNSAL'a, değerli yorum ve katkılarıyla çalışmamı kolay hale getiren sayın Prof. Dr. Cem AVCI'ya, bilhassa matematik denklemlerin çözümü ve yorumlanmasında yardımcı olan sayın Prof. Dr. Reha ARTAN'a, çalışmamda bana destek olan arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Mehmet ÖZGER'e, Harita Yük. Müh. Hüseyin BAYRAKTAR'a, Sayısal Yöntemler Uzmanı A. Murat KILIÇ'a, Harita Mühendisi İsmail Selçuk ÇAYIRDAĞ'a, Opr. Dr. M. Aziz HATİBOĞLU'na ve Adli Tıp Uzmanı Nezir MAZİ'ye şükranlarımı sunarım.

Aralık 2004

İnş. Yük. Müh. Abdüsselam ALTUNKAYNAK

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. YERALTI SUYU, ÖNEMİ VE SORUNLARI	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yeraltı Suyu Akım Kanunları	2
1.3. Tezin Amacı	4
2. YERALTI SUYU VE HAZNELERİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Hazne Tanım ve Türleri	5
2.3. Gözenekli Ortam	6
2.4. Yeraltı Suyu Tabakaları	9
2.4.1. Doygun tabaka türleri	9
2.4.1.1. Akifer	9
2.4.1.2. Akiklud	10
2.4.1.3. Akifüj	10
2.4.1.4. Akitard	10
2.5. Çoklu Yeraltı Suyu Hazneleri	10
2.6. Akifer Türleri	11
2.6.1. Basıncsız akifer	12
2.6.2. Basıncılı akifer	12
2.7. Su Kuyuları	13
3. SABİT HİDROLİK İLETKENLİKLİ AKİFERLERDE YERALTI SUYU AKIMI	16
3.1. Giriş	16
3.2. Hidrolik Eğim	17
3.3. Darcy Kanunu	18
3.4. Doğrusal Olmayan Yeraltı Suyu Akımı	20
3.5. Permanan Akım	22

4. DEĞİŞEN HİDROLİK İLETKENLİKLİ AKİFERLERDE YERALTI SUYU AKIMI	23
4.1. Giriş	23
4.2. Hidrolik İletkenlik Değişimli Akım	23
4.3. Dinamik İletkenlik	24
5. MESAFE DEĞİŞİMLİ HİDROLİK İLETKENLİK	27
5.1. Giriş	27
5.2. Genel yaklaşım	27
5.2.1. Doğrusal iletkenlik değişimi	27
5.2.2. Üstel iletkenlik değişimi	29
5.3. Bağımsız Durum	30
5.3.1. Doğrusal iletkenlik değişimi	31
5.3.2. Üstel iletkenlik değişimi	33
5.3.3. Çakıştırma yöntemi parametre tayini	36
5.3.4. Tip eğriler	39
5.4. Bağımlı Durum	42
5.4.1. Doğrusal iletkenlik değişimi	43
5.4.2. Üstel iletkenlik değişimi	47
5.4.3. Tip eğriler	51
6. UYGULAMALAR	55
6.1. Giriş	55
6.2. Uygulama Alanı ve Veri Davranışı	56
6.3. Bağımsız Durum	63
6.3.1. Doğrusal iletkenlik değişimi uygulamaları	63
6.3.2. Üstel iletkenlik değişimi uygulamaları	65
6.3.3. Pratik karşılaştırma	67
6.4. Bağımlı Durum	69
6.4.1. Doğrusal iletkenlik değişimi uygulamaları	70
6.4.2. Üstel iletkenlik değişimi uygulamaları	72
6.4.3. Pratik karşılaştırma	74
6.5. Genel Değerlendirmeler	74
7. SONUÇLAR, BULGULAR,YORUMLAR VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	87

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 6.1. Basıncılı akifer için permanan akım verisi (Ahmad, 1998)	57
Tablo 6.2. Basıncılı akifer için permanan akım verisi (Şen, 1995)	68
Tablo 6.3. Bağımsız durum için akifer parametreleri	76
Tablo 6.4. Bağımlı durum için akifer parametreleri	76

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Akifer türleri.....	11
Şekil 2.2 : (a) Basıncsız akifer (b) Basınclı akifer.....	13
Şekil 3.1 : Hidrolik eğim.....	17
Şekil 3.2 : Darcy cihazı kısımları.....	18
Şekil 3.3 : Gözenekli ortamda beklenen doğrusal ve doğrusal olmayan piyezometrik eğim-özellik debi ilişkisi.....	21
Şekil 5.1 : Tip eğri ve arazi verileri kağıtları Theis (1935) tip eğrisi.....	37
Şekil 5.2 : Boyutsuz mesafe ile boyutsuz kuyu fonksiyonunun değişimi a) Doğrusal yaklaşım b) Üstel yaklaşım.....	40
Şekil 5.3 : Bağımsız durum için tip eğri demeti (a) Doğrusal yaklaşım (b) Üstel yaklaşım.....	41
Şekil 5.4 : Bağımlı durum için tip eğri demeti (a) Doğrusal yaklaşım, (b) Üstel yaklaşım.....	52
Şekil 6.1 : Çalışma alanı	56
Şekil 6.2 : CTW-29' da pompaj ve gözlem kuyularının planı	57
Şekil 6.3 : Ana kuyu düşüm-zaman eğrisi (a) 200 dakika (b) pompaj süresi boyunca	58
Şekil 6.4 : Gözlem kuyuları düşüm-zaman eğrileri (a) 200 dakika, (b) pompaj süresi boyunca	60
Şekil 6.5 : Yarı-logaritmik kağıtta düşüm-zaman verileri, (a) ana kuyu (b) gözlem kuyuları.....	62
Şekil 6.6 : CTW-29 için mesafe-düşüm verileri	63
Şekil 6.7 : Doğrusal yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri CTW-29'daki gözlem kuyularının litolojik logları.....	63
Şekil 6.8 : Doğrusal yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	64
Şekil 6.9 : Üstel yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri	65
Şekil 6.10 : Üstel yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	66
Şekil 6.11 : Pompaj ve gözlem kuyuları planı	67
Şekil 6.12 : Doğrusal yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	68
Şekil 6.13 : Üstel yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	68
Şekil 6.14 : CTW-29 için mesafe-hidrolik yük verileri	70
Şekil 6.15 : Doğrusal yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri	71
Şekil 6.16 : Doğrusal yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	71
Şekil 6.17 : Üstel yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri	73
Şekil 6.18 : Üstel yaklaşım için tip eğri karşılaştırması	73

SEMBOL LİSTESİ

a	: Bağımlı durumda doğrusal yaklaşım modelinin ölçeklendirme parametresi (1/s)
b	: Bağımlı durumda üstel yaklaşım modelinin ölçeklendirme parametresi (1/m)
f	: Ters mesafe faktörü (1/m)
$h(r)$	: Hidrolik yük (m)
H	: Statik yük (m)
k_c	: Kuyu cidarındaki hidrolik iletkenlik (m/s)
K_1, K_2, K_3, K_4	: Entegral sabitleri
L_1, L_2, L_3	: Orantılılık sabitleri
m	: Akiferin kalınlığı (m)
q_c	: Kritik özgül debi (m ³ /s)
Q	: Debi (m ³ /s)
r	: Radyal mesafe (m)
r_c	: Kritik yarı çap(m)
R	: Kuyu tesir mesafesi (m)
$(R_e)_c$	: Kritik reynolds sayısı
$s(r)$	: Düşüm (m)
T	: İletim kapasitesi (m ² /s)
T_b	: Başlangıçtaki iletim kapasitesi (m ² /s)
T_D	: Dinamik iletkenlik sayısı (m ² /s)
u	: Boyutsuz zaman faktörü
u_r	: Bağımsız durumda boyutsuz üstel radyal mesafe
u_R	: Bağımsız durumda boyutsuz üstel tesir mesafesi
$V(r)$	: Yeraltı suyu hızı (m/s)
$W(u)$	: Kuyu fonksiyonu
$W(h)$	: Boyutsuz hidrolik yük fonksiyonu
$W(H)$	: Boyutsuz statik yük fonksiyonu
$W(u_R, x)$	: Doğrusal yaklaşım modelinin boyutsuz kuyu fonksiyonu
$W(\gamma_R, x)$	: Üstel yaklaşım modelinin boyutsuz kuyu fonksiyonu
x	: Boyutsuz mesafe oranı
α	: Bağımsız durumda doğrusal yaklaşım modelinin ölçeklendirme parametresi (1/s)
β	: Bağımsız durumda üstel yaklaşım modelinin ölçeklendirme parametresi (1/m)
θ_r	: Bağımlı durumda boyutsuz üstel radyal mesafe
θ_R	: Bağımlı durumda boyutsuz üstel tesir mesafesi
γ_r	: Bağımsız durumda boyutsuz doğrusal radyal mesafe
γ_R	: Bağımsız durumda boyutsuz doğrusal tesir mesafesi
η_r	: Bağımlı durumda doğrusal radyal mesafe
η_R	: Bağımlı durumda doğrusal tesir mesafesi

DOĞRUSAL OLMAYANYERALTI SU AKIMLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Klasik Darcy Kanunu'nda yeraltı suyu akımı hesaplamalarında, akiferin hidrolik iletkenliğinin sabit kaldığı kabul edilir. Bu durumda yeraltı suyu hareketinin sadece piyezometrik seviye değişiminden (hidrolik eğim) kaynaklanması söz konusudur. Pratikte su kuyularında yapılan araştırmalarda, büyük hidrolik eğimlerin ortaya çıktığı ve hidrolik iletkenliğin kuyudan itibaren azaldığı görülmektedir. Literatürde, önerilen yamalı (patchy) akifer çözümlerinde, kuyu merkezinden itibaren hidrolik iletkenliğin kademeli olarak azaldığı ve her bölgede sabit olduğu gibi bazı katı kabuller yapılmaktan ileriye gidilememiştir. Halbuki pratikte, gözenekli ortamda hidrolik iletkenliğin kuyu cidarından itibaren sürekli olarak azaldığı bilinmektedir.

Bu tezin amacı, permanan akım halinde kuyu çevresinde mesafe ile değişen hidrolik iletkenlik şartı göz önünde bulundurularak akifer parametrelerini akifer sınamaları ile tayin edebilmek için yeni yöntemler geliştirmek ve klasik Darcy Kanunu'nun doğrusal olmayan şeklini araştırmaktır. Basıncı bir akiferdeki kuyu etrafında hidrolik iletkenlik değişiminin, radyal uzaklığın fonksiyonu olarak, doğrusal (lineer) ve üstel (eksponansiyel) şekilde azaldığı düşünülmüştür. Basıncı akiferlerde permanan akım durumu formülleri, ana kuyudan itibaren hidrolik iletkenliğin doğrusal ve üstel değişimi için yeniden çıkartılmıştır. Bu yaklaşımların her biri, özel çözüm olarak klasik yaklaşımların formülasyonlarını vermektedir.

Çalışma iki aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar; hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün, birbirinden bağımsız ve bağımlı durumları için akifer parametrelerini belirleyen yeni bağıntıların çıkarılması ve yorumlanarak, mevcut bağıntılarla karşılaştırılmasıdır. Bu iki durum için kendi içlerinde de karşılaştırma yapılmıştır. Her iki durum için elde edilen sonuçlar birbiriyle ve literatürde mevcut olan yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da hidrolik iletkenlik değişiminin, mesafenin fonksiyonu olarak doğrusal (lineer) ve üstel (eksponansiyel) olarak azalma halleri ele alınmış ve gerçek arazi verilerine tip eğriler geliştirilerek karşılaştırma yöntemi uygulanarak akifer parametreleri belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF NON-LINEAR GROUNDWATER FLOWS

ABSTRACT

In groundwater flow computations, classical Darcy Law considers constant hydraulic conductivity. In this case, groundwater movement is a function of the change of piezometric level (hydraulic slope) only. In practice, groundwater well researches indicated that big hydraulic slopes appear as a result of various factors such as the aquifer material heterogeneity including fractures\ solution cavities etc. and hence the front and hydraulic conductivity decreases within the well vicinity starting from the well. In literature, for instance in the case of patchy aquifer solutions, assumptions couldn't go beyond of accepting that the hydraulic conductivity is decreasing gradually starting from the well center and is constant at every grade. However in practice, it is known that hydraulic conductivity decreases continuously starting from well periphery in the porous medium.

The aim of this thesis is to develop new methods for determining aquifer parameters via aquifer tests, under permanent flow state by assuming hydraulic conductivity variation with radial distance and the non-linear version of Darcy law. Variation of hydraulic conductivity around wells at a confined aquifer has been thought as a function of radial distance in a decreasing linear and exponential forms. Permanent flow state formulas for confined aquifers have been derived for linear and exponential variation of hydraulic conductivity from the main well. Both of these approaches reduce to the formulations of classical approaches in the case of constant hydraulic gradient as special solutions.

This study consists of two stages. These are the derivation of new relations which provide the opportunity to determine the aquifer parameters for dependent and independent cases of hydraulic conductivity and hydraulic load. Furthermore their comparisons are also presented current classical relations. Both of these cases are compared also among themselves. The results obtained for both of cases are compared also with the current methods in the literature. For both cases, variation of hydraulic conductivity has been taken up as a function of distance in linear and exponential functional forms. On the other hand the developed methodologies are applied to actual field data by developing the necessary type curves and then by the

application of type curve matching methodology by which aquifer parameters are determined.



1. YERALTI SUYU, ÖNEMİ VE SORUNLARI

1.1 Giriş

Yeraltı suyu kullanımı açısından, suyun kaynağını, miktarını ve hareketini anlamak önemlidir. Yunanlı filozoflardan Homer, Thales ve Platon, kaynakların deniz suyu etkisiyle, dağların altındaki yeraltı boşluklarından beslendiğini ve daha sonra arıtılmış olarak yüzeye çıktığını hipotez olarak öne sürmüşlerdir. Aristo ise, soğuk ve karanlık mağaralara giren havanın burada yoğunlaşarak suyu oluşturduğunu ve kaynakları beslediğini iddia etmiştir. Ancak, hidrolojik çevrimin bilimsel anlamda ilk tanımı 17. asırda yapılmış; ilk defa gözlemlere ve ölçümlere dayanan teoriler ortaya atılmıştır. Günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından katkıda bulunulmuş olsa da, maalesef yeraltı suyu konusu, bilim dünyasında hala yeterli ilgi görmemektedir. Gerek dünyada gerekse ülkemizde yeraltı suyu ile ilgilenen araştırmacılar çok azdır. Halbuki, doğal sular içerisinde yeraltı suları çok önemli bir su kaynağıdır. Dünyadaki suların genel dağılımı; % 97.32 tuzlu okyanus suyu, % 2.14 buzul, % 0.61 yeraltı suyu, % 0.009 yüzey suları, % 0.0005 toprak nemi, % 0.0001 atmosferdeki suyundan oluşmaktadır (Freeze ve Cherry). Ülkemizdeki dağılım da buna paraleldir. Yukarıda sıralanan dağılımdan, yeraltı sularının buzullardan sonra en büyük tatlı su potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Gerek kullanım ve gerekse maliyet bakımından yeraltı suyunun kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. Özellikle günümüzdeki gibi, küresel ısınmanın su kaynaklarına olan olumsuz etkilerinin konuşulduğu bir dönemde, yeraltı suyunun bilhassa kurak bölgelerdeki önemi daha da artmaktadır. Ülkemizde bulunan 26 su toplama havzasında gelecek 50 yıl içerisinde yağış ve akış miktarlarında büyük azalmalar beklenmektedir. Bu nedenle mevcut yeraltı su kaynaklarının korunması ve optimum işletimi için yeni yöntem ve teknolojiler geliştirilmelidir.

Yeraltı suyu, su kaynakları içerisinde en verimli ve en zengin olmasının yanı sıra, yüzeysel sulara nazaran kirlenmelere karşı muhafazalı olma, donma ve buharlaşma gibi mevsimsel sıcaklık farklarından etkilenmeme, büyük maliyetler gerektiren biriktirme hazneleri inşaa etmeyi gerektirmeme gibi faydalara sahiptir. Ayrıca yeraltı

suyu sürekli olarak tabii bir filtre ile süzüldüğünden, yüzeysel sulardan daha sağlıklıdır. Bu özellikleri nedeniyle yeraltı suları, içme suyu kullanımındaki su kaynaklarının başında gelmektedir. Günümüzde artan teknoloji imkanları, yerin derinliklerinde bulunan petrol, doğalgaz ve yeraltı su kaynaklarına ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, kuyular aracılığıyla temiz, ucuz ve uzun süreli olarak su temin edilmesi kolaylaşmıştır.

Bilindiği gibi yüzey ve yeraltı sularının asıl kaynağını yağmur ve kar suları oluşturduğundan, yeraltı suyu incelemelerinde, hidrolojik çevrimin yağış ve sızma kısımları çok önemlidir. Bu bakımdan, kaynağın incelenmesinde hidrolojik ve jeolojik özelliklerin göz önünde tutulması önemlidir.

1.2 Yeraltı Suyu Akım Kanunları

Klasik Darcy Kanunu'na göre, yeraltı suyu akımı hesaplarında, akifer hidrolik iletkenliğinin sabit kaldığı kabulü vardır (Darcy, 1856). Bu durumda, yeraltı suyu hareketinin sadece piezometrik seviye değişiminden (hidrolik eğim) kaynaklanması söz konusudur. Pratikte, su kuyularında yapılan araştırmalarda, kuyunun yakın çevresinde yeraltı suyu hızının yüksek olduğu ve ince maddelerin yıkanması sonucunda daha büyük hidrolik eğimlerin ortaya çıktığı ve hidrolik iletkenliğin kuyudan itibaren azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak, yer sarsıntıları (depremler) da akiferlerde hidrolik iletkenliğe etki etmektedir. Literatürde, permanan durumdaki değişken iletkenlikli akiferler için yamalı (patchy) akifer çözümleri önerilmiştir. Bu çözüm ile, kuyu merkezinden belli bir uzaklığa kadar hidrolik iletkenliğin sabit bir değerde olması ve belli bir mesafeden sonra da, daha düşük fakat yine sabit olması gibi bazı sınırlayıcı kabuller yapılmaktan ileriye gidilememiştir (Vandelberg, 1977; Barker ve Herbert, 1982; Şen, 1987). Pratikte, hidrolik iletkenlik kuyu cidarından başlayarak kademeli olarak azalmaktadır. Bu tezin amacı, permanan akım halinde kuyu çevresinde mesafe ile değişen hidrolik iletkenlik şartı göz önünde bulundurularak, akifer parametrelerini, akifer testleri ile tayin edebilmek için yeni bir yöntem geliştirmektir. Çalışmada basınçlı bir akiferdeki kuyular etrafında hidrolik iletkenlik değişiminin, radyal uzaklığın fonksiyonu olarak, doğrusal (lineer) ve üstel (eksponansiyel) azalma halleri düşünülmüştür.

Klasik yeraltı suyu incelemelerinde, akım alanında hidrolik iletkenlik sabit kabul edildiğinden, Darcy Kanunu'na göre, yeraltı suyu akımının hızı sadece piyezometre eğimine bağlıdır. Bu çalışmada,

$$\text{“Dinamik iletkenlik (kh) = Hidrolik iletkenlik (k) * Hidrolik yük (h)”}$$

tanımlanarak yeraltı suyu akımı, dinamik iletkenliğin mesafe ile değişimine bağlı olarak incelenecektir. Böylece, yeraltı suyu akımında sadece hidrolik yükün değil, aynı zamanda hidrolik iletkenliğin de mesafe ile değişkenliği esas alınacaktır.

Klasik çalışmalarda, akifer, izotropluk ve homojenlik kabulleri ile ideal olarak düşünülmektedir. Bununla beraber, saha ölçümlerinden, bu kabullerden sistematik sapmalar olabileceği görülmektedir. Küçük ölçekte bile tüm akiferler homojen ve izotrop yapıda olmaktan uzaktır. Bu ise, hidrolik iletkenliğin rasgele veya sistematik bir şekilde değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, büyük ölçekte bu yerel heterojenliklerin ortalaması alınarak klasik yöntem uygulamaları yapılır [Theis (1935), Hantush (1964), Papadopoulos ve Cooper (1967), Şen (1986)]. Akifer, hidrolik iletkenliğin kademeli olarak değiştiği iki veya daha fazla ayrık bölgeden oluşuyorsa, bu konu üzerinde ayrıntılı bir araştırma gerekmektedir. Pratikte, bu gibi değişimler pompaj kuyularının etrafında meydana gelmektedir.

Hidrolik iletkenliğin değişimi ile yeraltı suyu akımlarının incelenmesi ilk defa Muskat (1937) tarafından, sadece permanan akım halinde yamalı (patchy) akiferler için yapılmıştır. Bundan sonra, Streltsova (1978) ve Şen (1986) heterojen akiferler ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. Barker ve Herbert (1977) özellikle yamalı akiferler üzerinde durup, permanan akım hali için pompaj testlerinin sonuçlarını kullanarak analitik çözüm ile sayısal simülasyon modelini geliştirmişlerdir.

İnce malzemelerin boşlukları tıkaması, mikro bakterilerin üremesi, basıncın düşmesinden dolayı çözünmüş gazların açığa çıkması ve besleyen yüzeyden sızan suların akiferde bulunan mevcut su ile kimyasal reaksiyona girmesi gibi çeşitli nedenler, hidrolik iletkenliğin kuyunun tesir mesafesine doğru kademeli olarak azaldığını göstermektedir (Nightangel ve Bianchi 1973; Bear 1979; Todd 1985).

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, hidrolik iletkenliğin değişimini göz önünde bulundurarak, klasik Darcy Kanunu'nun doğrusal olmayan şeklinin kuyu hidroliğine olan etkilerini araştırmaktır. Basınçlı akiferlerde permanan akım hali formüllerinin, ana kuyudan itibaren hidrolik iletkenliğin doğrusal ve üstel değişimi için, dinamik iletkenlik tanımını da göz önünde bulundurarak çıkarılması hedeflenmektedir. Yukarıda açıklandığı üzere bir çok araştırmacının yaptıkları çalışmalarda akifer homojen kabul edilmiştir. Bu tezde, akifer heterojen kabul edilerek permanan akım için yeraltı suyu hareket denklemleri yeniden elde edilecektir. Ayrıca hidrolik iletkenliğin değişken olarak alınmasının yanında hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün birbirine bağımlı olarak değişmesi durumunun etkisi de bu tezde araştırılacaktır. Dolayısı ile, çalışma iki aşamada ele alınacaktır. Birinci aşamada sadece hidrolik iletkenliğin değişmesi göz önünde bulundurularak **“bağımsız durum”** adı altında, ikinci aşamada ise hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün birbirine bağımlı olarak değişmesi durumu da **“bağımlı durum”** adı altında incelenecektir. Ayrıca her iki durumda elde edilen bağıntıların çıkarılması ve yorumlanarak mevcut bağıntılarla karşılaştırılması sunulacaktır. Her iki durum için tip eğriler elde edilecek ve belirli bir bölgeye ait veriler kullanılarak akifer parametreleri yeni yönteme göre belirlenecektir.

2. YERALTI SUYU VE HAZNELERİ

2.1. Giriş

Canlıların hayatlarını devam ettirebilmesi, güncel hidrolojik çevrimin çalışmasına paralel olarak, tabiatta suyun yeterli miktarda, uygun zaman ve konumda bulunmasına bağlıdır. İnsanoğlunun vücut yapısının % 60'nı su oluşturmaktadır. Tarih boyunca insanların suya olan bağımlılıkları devam ede gelmiştir. Bu yüzden, yerleşim yerleri, sürekli su kenarları olan denizler, göller, akarsular veya yeraltı su kaynakları etrafında kurulmuştur. İnsanoğlu haberleşme, savunma, beslenme ve sağlık ihtiyaçlarını karşılayabilmek için suya her zaman gereksinim duymaktadır. Modern çağda, kalkınmış toplumlar kalkınmamış toplumlardan çok daha fazla su tüketmektedir. Bu istatistik, sarf edilen su miktarı değerlerinin, o ülkenin hayat standardına ışık tuttuğunu göstermektedir.

İnsanlığın zamanla artan su talebinin karşılanabilmesi için, mevcut kaynaklara ek olarak, sulak zamanlarda fazla olan su miktarını kurak zamanlarda kullanabilmek amacıyla biriktirme hazneleri inşa edilmiş veya yeraltındaki gözenekli ortamlar içinde biriken suyu kullanarak gerekli tedbirler alınmıştır. Bu birikmiş kaynaklardan yararlanmak için baraj ve kuyu grupları inşa edilmiş, uzak bölgelerdeki su kaynaklarını yerleşim alanlarına getirmek için bir takım arayışlara girişilmiştir. Akarsuların sedde, bağlama veya barajlar kullanılarak su yolunun kesilmesi suretiyle biriktirme hazneleri inşaa edebilmekte ve böylece su talebi karşılanmaktadır. İnşaa edilen bu su yapıları ile içme suyu ihtiyacının yanı sıra tarım ve enerji ihtiyaçlarının karşılanması da amaçlanmaktadır.

2.2 Hazne Tanım ve Türleri

Kayaküre (litosfer) sadece katı maddelerden veya kısmen boşluklardan oluşan kaya kümelerinden meydana geldiği kabul edilen sürekli bir bileşimdir. Boşluklu ortamlar, yeraltı suyunun depolanması ve ihtiyaç halinde kullanılması için uygun koşullar altında saklanması sağlar. Kayakürede yer alan, kendi içinde özel ancak birbirlerini

tamamlayıcı hacimleri olan boşluk ve katılara hazne adı verilir. Bu bağlamda, kayaküreyi geniş anlamda, hazne olan veya olmayan şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Bir hazne, yüzeyden sızan suyun içerisine girmesine müsaade eden boşluklara sahiptir. Kum, kireçtaşı, kil gibi bir çok tortul yapı hazne özellikleri, bir çok volkanik kaya da hazne olmayan özellikler göstermektedir. Yeraltı suyunun kaynaklardan elde edilebilmesi için boşlukların bulunması gerekli ama yeterli bir şart değildir. Bunun yanında, bazı hazneler ihtiyaç duyulduğunda suyun kolayca hareket etmesine izin vererek yeterli şartı da sağlarlar. Bunlara geçirgen hazne, tersi durumda ise geçirgen olmayan hazne adı verilir. Genel olarak, bir haznenin mevcudiyeti, içinde suyun bulunması ile eşdeğerlidir, ancak suyun belli bir yönde hareket etmesi halinde geçirgen haznelere söz edilebilir. Bu tezde, geçirgen haznelerdeki yeraltı suyu hareketi, haznenin heterojen özelliğe sahip olması durumunda incelenerek gerekli analitik çözümler sunulmuştur. Boşluklu ortamların jeolojik evrimine dayanarak, geçirgen hazneler üç alt ana gruba ayrılabilir. Bunlar, gözenekli, çatlaklı ve karstik ortamlardır. Bu tezde yeraltı suyu hareketi için sadece gözenekli ortamlar göz önünde tutulmuştur.

2.3 Gözenekli Ortam

En önemli ve en çok bilinen hazneler, düzenli ya da düzensiz şekilde bir araya gelerek kum ve çakıl karışımlardan meydana gelmiştir. Bu tür ortamlar, farklı boyut ve şekillerde, sayısız ve düzensiz boşluklar içerirler. Bunlara çakıl veya kum parçacıklarının arasındaki münferit ara boşlukları adı verilir. Her gözenek, farklı boyutlardaki gözenekler ile kanallar şeklinde karmaşık seri veya paralel olarak birbirlerine bağlanarak su hareketine imkan tanıyacak şekilde boşlukları meydana getirir. Bu gözenek ve kanal toplulukları, içinde suyun bir çok farklı yöne hareket edebileceği bir şebeke oluşturur. Herhangi bir kayaküre içindeki bu tür oluşuma gözenekli ortam adı verilir.

Katı parçacıkların boyutları küçüldükçe, akış yönü ve katı maddelerin su hareketine karşı mukavemeti hemen her noktada daha düzenli bir hale gelir. Böylece her su parçası, katı madde dizilişinin sürekli direnci ile karşı karşıyadır. Burada “direnc”, suyun ortamda hareket ederken maruz kaldığı zorluk anlamında kullanılmıştır. Diğer taraftan, kaba tanecikli bir ortamda su daha az dirençle karşılaşacak ancak akış yolu daha düzensiz ve akış oranları daha büyük iniş çıkışlar gösterecektir. Yukarıdaki

ifade suyun kaba tanecikli bir ortamda, ince tanecikli bir ortama nazaran daha kolay hareket edeceği anlamına gelmektedir. Yeraltı suyu ile ilgili, çoğu araştırma ve çalışma gözenekli ortamlar içinde yapılmıştır. (Thiem, 1906; Theis, 1935; Cooper ve Jacop, 1946; Hantush, 1957; Boulton, 1963; Streltsova, 1978; Neumann, 1972; Şen, 1982; 1988; 1988a, b; 1989, 1990) Bunun sebebi doygun kum kümelerinin en sık rastlanan akiferler olması ve bu ortamın karmaşık çalışmalara uygunluğudur.

Bu çalışmalarda, klasik Darcy (1856) Kanunu ile yeraltı suyu hızı temsil edilirken gözenekli ortam özelliklerinin (hidrolik iletkenlik gibi) homojen olduğu temel kabulü yapılmıştır. Bu tezin ana hedefi, bu tür klasik çalışmaların aksine gözenekli ortamın heterojen olduğu kabulüne dayanan yeraltı suyu akım hareketinin modellerinin analitik olarak çıkarılmasıdır. Çıkarılan formüllerin, homojen şartlarda, daha önceden değişik araştırmacılar tarafından verilen ifadelere indirgenmesi ile doğrulukları kanıtlanmıştır. Genel olarak, farklı kökenlerden aşınma ile gelen tortul kayalar ve çökeller, yeraltı suyunun hareket etmesi için uygun gözenekli ortamı meydana getirirler.

Gözenekli ve geçirimli olan alüvyon yelpazeler, bir akımın dik bir vadiyi terk edip bir ovaya girdiğinde yavaşlaması sonucu ortaya çıkarlar ve özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bolca bulunurlar. Alüvyon yelpazenin genişlemesi drenaj havzasının eğimi, boyu, iklimi ve kaynak alanındaki kaya özelliklerine bağlıdır. Alüvyon yelpazelerdeki yeraltı suyu akımı nehir suyunun süzülmesiyle yenilenir. Çoğunlukla su, pınar veya kaynak olarak yeryüzüne çıkar veya yolculuğuna akış yönünde yüzey akımı olarak devam eder.

Diğer taraftan alüvyon dolgular, iklim şartları ve suyun dolgulara doğru hareketi sonucu meydana gelirler. Erozyonun en kaba parçaları olan çakıllar kaynaklarından, kum, kil veya çamurun olduğundan daha kısa mesafelere taşınırlar ve daha kısıtlı alanlarda birikirler. Bir alüvyon dolgunun kalınlığı bir kaç yüz metreye ulaşabilir (Şen, 1995).

Yeraltı suyu geçirimli haznelerinden bir diğeri de delta birikmesidir. Altyapı açısından deltalar denize değil karaya ait birikintilerdir. Deltalar, akım kanalının bir göl veya okyanus gibi büyük bir su kütesine ulaşması sonucu oluşur. Deltada biriken düzensiz maddeler denize doğru sırayla kumla başlar, sonra silt, açık deniz kili ve çamur gelir. Deltalardaki yeraltı suyu yükselmeleri neredeyse sabittir ve bu da

yakınlarındaki büyük su kütlesinin yükselişinin yansımasıdır. Böylece, tatlı su göllerinin yakınındaki oluşmuş deltalar yeraltı suyu işleme için mükemmel imkanlar sağlar. Ne var ki, her zaman okyanuslardan tatlı yeraltı sularına tuzlu su karışabilmektedir. Tuzlu su girişinin boyutu, deltadaki yeraltı suyunun yüksekliği ile okyanus yüzeyinin yüksekliği arasındaki mesafeye ve delta birikintisinin doğasına dayanmaktadır.

Önceden varolan kaya maddelerinden, hava durumu ve erozyon gibi süreçler sonucu ortaya çıkan katı maddelere ayrık tortul kayalar adı verilir. Ayrık kayalar parçacıklarının boyutlarına göre alt gruplara ayrılırlar. Çakılların baskın olduğu kayalar, kül tabakalarının sıkışması sonucu meydana gelen kumtaşı ve balçık kayalar, olmak üzere üç ana grup vardır.

Ayrık tortul yapılar içinde çok geniş alanlara yayılmaları ve yer yer 10 km'ye varan kalınlıklarıyla kumtaşları en önemli sınıfı teşkil ederler. Bunlar, rüzgar veya su vasıtasıyla meydana gelen her tür kaya erozyonu yoluyla oluşabilirler. Dizilme maddeleri kum parçaları olduğu için, genellikle su, petrol gibi akışkanların ve gazların birikip hareket edebileceği bol boşluklara sahiptirler. Bu özellikleri onlara ekonomik önem kazandırır.

Yukarıda bahsedilen oluşum farklılıklarından ayrı olarak kumtaşının içinde yer alan silt veya sertleşmiş kil, kısmi veya yaygın kil yatakları akımı etkileyebilir. Örneğin, yaygın silt taşı tabakaları, tüm kumtaşı haznesini bitişik tabakalarla akışkan alışverişi olmayan bir tabakalaşmış hazneye dönüştürebilir veya tam tersi de gerçekleşebilir. Su depolama ve iletimi için en uygun yapılar, çoğunlukla ayrık tortul kayalarda bulunur. Bu kayalar tortul yapılarda yer alan yeraltı suyu birikintisinin % 80'ini ihtiva eder. Biriktirme süreci esnasında ince parçacıklar su vasıtasıyla kaba olanlardan daha uzağa sürüklenebileceği gibi (taşıyıcı akımın veya rüzgarın nispeten zayıf olduğu durumlarda) daha ağır ve kaba parçalar ince taneli olanların üzerine taşınarak birikebilirler. Müteakip birikmelerin bir sonucu olarak tabakalaşmış bir hazne, her yatak iki değişik litolojik birikinti oluşturmak üzere jeolojik zaman içerisinde meydana gelir.

Tektonik hareketler, tortul kayalara çeşitli şekiller verirler. Bunların en belirgin olanları senklinal ve antiklinal'dır. Senklinallar, içinde yeraltı suyunun bolca

bulunabileceği kubbelerdir. Antiklinallar ise, yeraltı suyu için potansiyel alanlar olarak değerlendirilmezler.

2.4 Yeraltı Suyu Tabakaları

Yeraltı suları, bulundukları haznenin fiziki yapısına göre farklı gruplara ayrılabilir. Kayakürenin her boşluğunun suyla doldurulduğu kısımda doymun tabaka bulunur. Bu tabakanın üzerinde, havalandırma veya doymamış tabaka bulunur. Bu tabaka su, nem ve hava karışımından meydana gelir. Bu tabakada hava ve nem değişimi serbesttir. Doymamış tabakada toplanan suya, yeraltı suyu seviyesi (tablası) üzerindeki su adı verilir. Bu da üç farklı kısma ayrılır. Bunlardan ilki, bitkilerin yaşaması için gerekli olan toprak nemi tabakasıdır. Kalınlığı toprağın türüne ve bölgenin hakim iklimine göre değişir. Suyun bu tabakadaki hareketi, çevre koşullarına göre aşağı veya yukarı doğru olabilir. Bu noktada, toprak emişi (kılcal) ve yerçekimi iki hakim güç olarak karşımıza çıkar. Daha sonra orta tabaka gelir ve kılcal saçakların sınırladığı noktaya dek devam eder. Bu tabakada su hareketleri, iki farklı maddenin (su ve toprak) moleküllerinin bağlayıcı (adhesion) gücüne bağlıdır. Kılcal saçaklar, doymun tabakanın hemen üzerinde yer alırlar ve kılcal ara boşluklara sahiptirler. Bunların bazıları veya hepsi, doymun tabakaya ait su ile doludurlar. Bu suyu doymun tabakadan yukarı çeken ise, yerçekimine karşı hareket eden kılcal emici güçlerdir.

2.4.1 Doymun tabaka türleri

Kayaküre boşluklarında su içeren her katman hazne olarak adlandırılmıştır. Yeraltı suyu problemlerinin çözümünü kolaylaştırmak için haznelerin ayrımı ve sınıflandırılması gerekmektedir. Su depolama ve iletim özelliklerine (yeraltı suyu hareketleri) dayanarak jeolojik yapılar dört hidrojeolojik birime ayrılabilir. Bunların en önemlisi yeraltı suyu literatürü terminolojisinde akifer olarak nitelendirilir.

2.4.1.1 Akifer

Meinzer (1923) akiferi, kaynak ve pınarlara belirgin miktarda su verebilecek derecede doymun ve geçirgen hazneler olarak tanımlar. Bir akifer, normal koşullar altında belirgin miktarda suyu kolaylıkla iletebilen doymun bir jeolojik birimdir. Bu tanımdaki “doymunluk”, “kolaylık” ve “belirgin” ifadeleri akiferlerin su ile alakalı tanımı için temel teşkil ederler. Diğer taraftan, bir akifer, kuyular aracılığıyla ekonomik olarak belirli miktarda su veren jeolojik tabakadır. Bu tanımlama da

jeolojiden ziyade, hidrolik ve ekonomi ile yakından ilgilenen yeraltı suyu mühendislerince tercih edilir. Son bir tanım ise akiferin, içinde yeraltı suyunun hareket ettiği bir kaya tabakası olduğunu söyler. Bu son ifade sadece yeraltı suyunun hareketi ile ilgilenen ve uzman olmayan kişiler içindir. Akifer olarak davranan kaya tipleri; çakıl, kum ve kumtaşı, alüvyon, oyulmuş kireçtaşı, yarık mermer, çatlak granit, hava koşullarında aşınmış gnays ve şist, parçalanmış kuvars, danecikli bazalt ve bitişik sleyt'tir. Suyun depolanma ve iletimi özelliklerinden biri veya her ikisinin bulunmaması durumunda üç farklı yeraltı suyu tabakası birimi ortaya çıkar. Bunlar; akitard, akifüj ve akiklud' tur.

2.4.1.2 Akiklud

Bu doygun jeolojik oluşum, suyu yavaşça emme kabiliyetine sahip olsa da bir kaynağı belirgin şekilde beslemesine yetecek derecede iletim özelliğine sahip değildir. Başka bir deyişle suyu depolayabilir ancak iletmez. Kil mercikleri ve sertleşmiş kil tabakaları bunlara örnektir. Bazı akikludlar ise suyu hiç mi hiç iletmezler.

2.4.1.3 Akifüj

Birbiri ile irtibatı olmayan gözenek boşluklarına sahip jeolojik tabakalara akifüj denir. Bunlar suyu ne emerler ne de iletirler. Bazalt ve granit iyi birer örnektir. Bu tabakaların meydana gelmesi sırasında boşluklarda hapsedilen sular irtibatsızlık sebebi ile bulundukları konumlardan çıkarılamazlar.

2.4.1.4 Akitard

Su depolayabilen ancak akifere oranla daha yavaş iletme ve daha az geçirgen bir doğaya sahip jeolojik tabakalara akitard denilir. Akifüj ile akiklud arasında bir geçişi temsil eder. Doğadaki akitardlar; killi, sertleşmiş killi ve billur kayalardır. Çoğunlukla yarı geçirgen tabakalar olarak adlandırılırlar.

2.5 Çoklu Yeraltı Suyu Hazneleri

Hidrojeolojik açıdan, yukarıda açıklanan dört farklı su tutucu birim kendi başına anlamlı değildir. Doğada karmaşık yeraltı suyu alanlarında bunların farklı kombinasyonları ortaya çıkar. Bu şekilde ard arda farklı yeraltı suyu taşıyan tabakalardan meydana gelen diziye hidrostratigrafi (çoklu yeraltı suyu) denir (Şen,

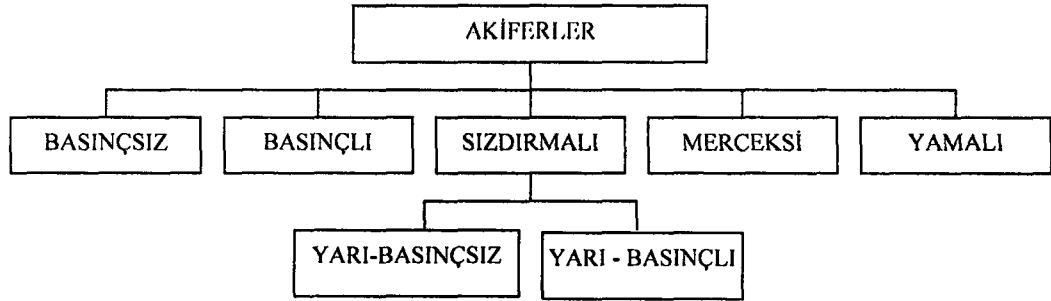
1995). Bir hidrostratigrafik dizinin yorumlanmasında şu noktalar göz önünde tutulmalıdır.

- 1- Bir akifer, suyu depolayıp iletebilen ve ekonomik manada kullanmaya imkan sağlayan, bitişik birimlere nazaran daha yüksek ilettime sahip bir birimdir. Bu açıklamanın ışığında, kumtaşı ve alüvyon sıralamaları kil ve kireçtaşına göre nispeten daha yüksek ilettime sahip oldukları için akifer olarak tanımlanır. Yine de hidrojeolojik yapıda üç tip akifer mevcuttur.
- 2- Düşük geçirgenlikleriyle akiferleri sınırlandıran sıra birimlere, akikludlar veya sınırlı yataklar adı verilir.
- 3- Sınırlandırılmış yataklar içerisinde belirgin miktarda hareket eden su varsa, bunlara da akitard ve yarı geçirgen tabaka veya sızıntılı tabaka adı verilir.

Diğer taraftan, hidrostratigrafi, akiferleri sınırlanmamış, sınırlı, sızıntılı ve mercek formlar olarak mevcut su basıncına göre sınıflandırmaya yarar.

2.6. Akifer Türleri

Akiferler, yüzeyaltı jeolojik yapılara, hidrolojik durumlara ya da yeraltı suyu basıncına göre Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilirler. Jeolojik tabakanın genişliği, bitişik katmanların türleri ve ihtiva edilen tabaka sayısı, yeraltı suyu çalışmasında dikkate alınacak önemli jeolojik etkenlerdir. Dikkate alınması gereken hidrolojik etken ise, doğrudan veya dolaylı olabilen beslenme mekanizmasıdır. Son olarak, yeraltı suyu basıncı atmosfer basıncına eşit ya da daha yüksek olabilir. Uygun bir akifer sınıflandırması bu üç tip veriyi aynı anda içermelidir zira hiç birisi tek başına yeterince anlamlı değildir. Jeologlar sadece jeolojik etkenleri dikkate almak eğilimindedirler ki, bu hatalı sonuçlara götürebilir. Diğer yandan, mühendisler çoğu zaman hidrolojik ve basınç koşullarına takılıp kalırlar ve bu da değerlendirmelerini hataya sürükleyebilir. Akiferlerin sınıflandırması aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.1 – Akifer türleri

2.6.1. Basınçsız akifer

Jeolojik açıdan bakıldığında, bu tip akiferler iki tabakalıdır ve atmosferle temas halindedirler. Alt tabaka akifüj özellikleri gösterirken, üst tabaka da su tutan ve hareketine müsaade eden bir jeolojik yapı gösterir. Serbest yüzeyli (basınçsız) bir akiferde, yeraltı suyu seviyesi (tablası), doymun tabakanın üst sınırını belirler. Buna ilaveten, su seviyesi mutlak basıncın atmosfer basıncına eşit olduğu ve suya göre bağıl basıncın sıfır olduğu noktayı göstermektedir. Bu akiferler, sızma ile doğrudan beslenmeye açıktırlar ve bu yüzden hidrolojik çevrime doğrudan bağlıdırlar.

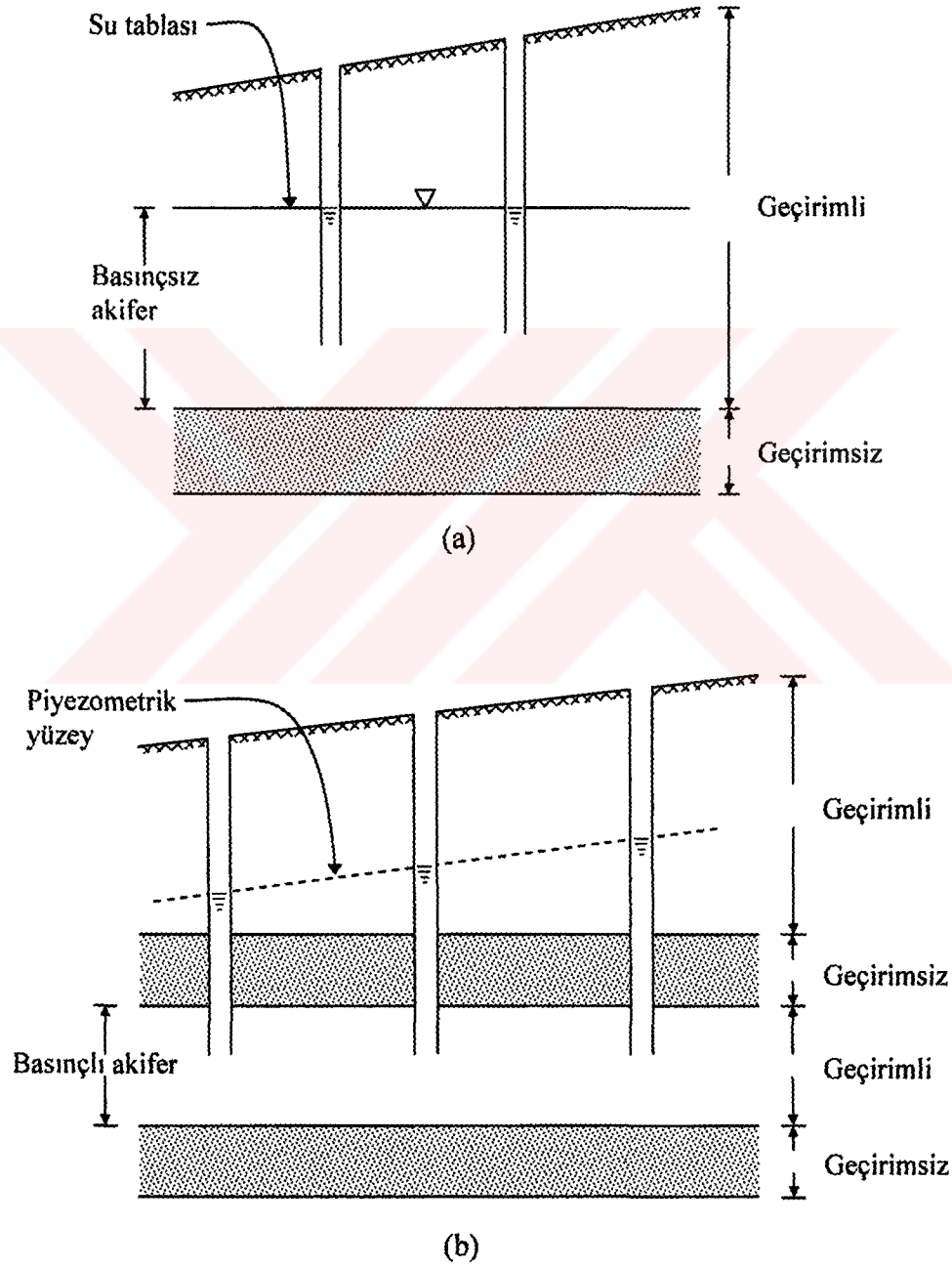
Basınçsız bir akiferde, yeraltı suyu doğrudan sadece atmosfer değişimlerinden etkilenir. Örneğin, yüzey seviyesi, yağışın miktarına özellikle de sızma oranına göre değişim gösterecektir. Suyun kimyasal bileşimi ve sıcaklığı da geçici olarak farklılıklar gösterir. Basınçsız akiferlerde, yeraltı suyu sığ derinliklerde meydana geldiğinden, buharlaşmadan kolayca etkilenirler. Su seviyesinin yüzeyi genelde dalgalı bir şekil izler ve sadece düzlüklerde yataydır. Yüzey eğimine ve kayalar arasındaki hareket kolaylığına bağlı olarak yerel yeraltı suyu akımı meydana gelir.

2.6.2. Basınçlı akifer

Bu tip akiferlerde en az üç tabaka vardır. Bunlardan ikisi akifüj ve ortadaki tabaka da akifer özelliği gösterir. Bu tabakalaşmanın bir sonucu olarak doğrudan beslenmeleri mümkün değildir. Akifer tamamen doymun ise, iki akifüj arasında sıkışmış olan yeraltı suyuna uygulanan ekstra basınç, her noktada atmosfer basıncının üzerindedir. İki akifüj, üst ve alt sınırlayıcı tabaka olarak adlandırılır.

Akiferde açılan herhangi bir kuyudaki su seviyesi yükselmesi, akiferin kotundan daha yukarıda olabilir. Suyun hayali olarak çıkabileceği bu noktalar topluluğu piyezometre seviyesini meydana getirir. Bir basınçlı akiferi için gerekli olan

özellikler, jeolojik olarak bir çok senklinal, monoklinal, çöküntüler, yalıklar, grabenler ve tektonik çatlaklar olmasıdır. Bu akiferlerin her zaman besleme, iletim ve boşaltım alanları olmak üzere üç bileşenleri vardır. Boşaltım alanında ise, akifer daha düşük yüksekliklerde çoğunlukla kaynaklar halinde yeryüzüne çıkar. Geçiş alanı ise, akiferin ana parçasını oluşturur ve burada iki sınırlayıcı geçirimsiz tabaka arasında yeraltı suyu bulunur. Basıncılı ve basınsız akifer türleri geçirimli ve geçirimsiz tabaka durumlarına göre Şekil 2.2.a ve Şekil 2.2.b’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 – a) Basıncısız akifer b) Basıncılı akifer

2.7 Su Kuyuları

Ev, tarım veya endüstri kullanımlarında bir akiferden düşey kazılar veya sondajlar vasıtası ile su çekilmesine yarayan yapılara su kuyusu adı verilir. Kuyular arzın derinliklerinde bulunan doygun tabakalardan en iyi biçimde su çekmek için tasarlanır ve kazılır. Bunların geometrik şekil ve boyutlarının seçimi arazinin jeolojik örtüsüne, topoğrafyasına, bölge iklimine, yağış ve beslenme özelliklerine, yüzeyaltı jeolojik tabakalarına ve istenilen talebe bağlı olarak seçilir.

Bir kuyunun açılmasından önce, kuyu açılacak yerin hidrolojik, yüzeyaltı jeolojik, ekonomik ve elde bulunan verilerden arazi yoklamaları yapılarak, bölge hakkında gerekli bilgiler toplanarak ve yorumlanarak bir karar vermek gerekir. Bu çalışmalar esnasında genel jeolojik yapı, jeomorfoloji ve kayaların sertlikleri konularında da bilgi sahibi olmak önemlidir. Toplanan tüm verilerin ışığı altında, kuyu enkesitleri, derinlikleri, çapları ve nüfuz etme miktarı gibi konular hakkında karar verilir.

İdeal bir kuyu enkesitinin, hesaplamalarda ve analitik modellerin yeraltı suyu için geliştirilmesinde kolaylıklar sağlaması için dairesel olarak seçilmesi tercih edilir. Bu kolaylıklar bu tezde geliştirilen yöntem için de kullanılmıştır. Bunlar, (Şen, 1995, 2004)

- (a) Yeraltı suyu basıncı, herhangi bir yatay düzlem üzerinde, kuyu cidarına üniform olarak radyal biçimde dağılıdır. Bunun sonucu olarak, kuyu cidarına teğet basınç bileşenleri yoktur. Basıncın radyal üniform dağılımlı oluşu, kuyu kılıf ve cidarına sıkıştırma kuvvetinin tesir ettiğini gösterir. Her şeyden önce, kırılğan olan jeolojik tabaka malzemesi, sıkıştırma kuvvetlerine kayma kuvvetlerinden daha mukavemetlidir. Bu sebeple dairesel enkesitli kuyuların cidarlarında çökmeler en aza indirgenir.
- (b) Diğer tüm enkesit şekilleri arasında, sabit bir alan için dairesel şekilli olanların çevre uzunlukları en azdır. Bu kazı esnasında sondaj başlığı ile kuyu cidarı arasındaki sürtünme kayıplarının en az olmasına işaret eder. Ayrıca, kuyunun kılıf ve filtrelerle kaplanması da ekonomik olur.
- (c) Dairesel olan kuyu cidarı bir eşpotansiyel eğrisi ve buna dik olan akım çizgileri ise radyal doğrular şeklindedir. Bunun anlamı, akifer malzemesinin homojen ve izotrop olması durumunda, akım ağının tamamen düzgün ve

belirgin olacağıdır. Bu tezde de, permanan yeraltı suyu akımının modellenmesi için tamamen dairesel kesitli düşey kuyular esas alınmıştır.

Gelişen endüstriye paralel olarak, suya olan talep çok artmıştır ve keson kuyularla alınan yeraltı suları bu talepleri karşılayamaz hale gelmiştir. Gelişen teknoloji, kazma kuyular yerine çok derinlere inebilerek su, petrol, doğal gaz ve maden elde edilmesine imkan veren sondaj kuyularının açılmasını mümkün kılmıştır. Böylece, sondaj kuyuları diye bir başka seçenek ortaya çıkmıştır. Bugün, pratikte en fazla kullanılan kuyular bunlardır. Bunlar, küçük çaplı ve değişmeyen biçimde daima daire kesitlidir. Çapları, genellikle *12 inç* yani *32 cm* civarındadır ve derinlikleri *2000 m*'ye kadar inebilir. Bu sebeple, çok katlı olan akiferlerden değişik derinliklerde yeraltı suyunun çekilmesi mümkün olmaktadır. Çapları küçük olduğundan kuyu haznesi hacmi ihmal edilecek kadar küçüktür. Az miktarda bile su çekilse kuyuda büyük düşümler ortaya çıktığından, akiferle kuyu arasında aniden beliren önemli hidrolik yük farkı dolayısı ile akiferin kuyudaki düşüme cevabı da ani olur.

3. SABİT HİDROLİK İLETKENLİKLİ AKİFERLERDE YERALTI SUYU AKIMI

3.1 Giriş

Yeraltı suyu akımının, zaman değişikliği bakımından permanan ve permanan olmayan durumları söz konusudur. Bu tezde permanan durum göz önünde bulundurulacaktır. Jeolojik tabakaların içinde bulunan yeraltı suyu, uygun su seviyesinin veya hidrolik eğimin ortaya çıkması ile boşluklardan hareket etmeye başlar. Yeraltı suyu hızı fiziksel olarak “alınan yolun zamana oranı” olarak tanımlanır. Ancak yeraltı suyunun aldığı yolu belirlemede güçlükler vardır. Bunun nedeni, jeolojik kayaçların içinde yeraltı suyu hareketine müsaade eden boşlukların birbirleri ile olan bağlantılarının meydana getirdiği akış yollarının pürüzlü ve rasgele olmasıdır. Bu yüzden araştırmacılar yeraltı suyunun tarifi için üç farklı tanım önermişlerdir (Şen, 1995). Birinci tanım; gerçek akım çizgisi uzunluğunun zamana oranı olarak verilmiştir. İkinci tanım; akım çizgisi uzunluğu yerine iki nokta arasında su moleküllerinin bir doğru ile birleştirilmesi ile elde edilen yol uzunluğunun zamana oranı olarak verilmiştir. Üçüncüsünde ise, yeraltı suyu hızına filtrasyon hızı, özgül debi veya Darcy hızı adı verilir ve akım çizgisine dik bir kesitin birim alanından geçen debi olarak adlandırılır. Bu tanımda önemli olan nokta akış yönüne dik kesitin tümünün boşluk gibi düşünülmüş olmasıdır. Bu tezde ise, yeraltı suyu akım hızı dinamik iletkenlik sayısının mesafe ile değişimi olarak tanımlanmıştır. Bir akiferde, yeraltı suyu hareketi ile ilgili diğer bir parametre de iletim kapasitesidir. Buna iletkenlik sabiti adı da verilir. Hidrolik iletkenlik birim akiferin verimini ifade ederken, iletim kapasitesi ise tüm akiferin verimi ifade etmektedir. İletim kapasitesi, hidrolik iletkenlik ile akifer kalınlığının çarpımına eşittir. İletim kapasitesi aynı zamanda, akiferin tüm kalınlığında birim genişlikte, birim hidrolik eğim altında, birim zamanda geçen akışkan hacmi olarak tanımlanır. Burada, iletim kapasitesi biriminin [$m^3/s/m$] olduğu ancak uygulamalarda [m^2/s] olarak kullanıldığını söylemekte yarar vardır.

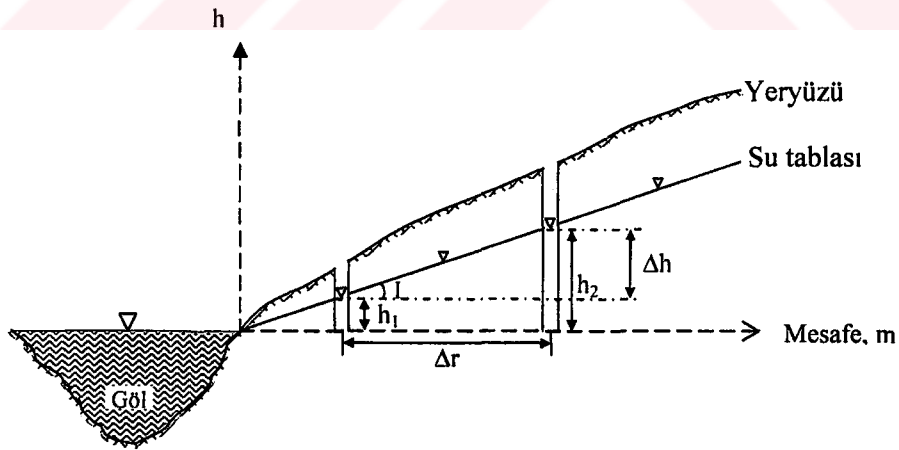
Sonuç olarak hidrolik iletkenlik birim genişlik ve birim kalınlık için, iletim kapasitesi ise birim genişlik ve tüm akifer kalınlığı için geçerlidir.

Bu tezde, akiferin heterojen yapıya sahip olduğu kabul edilerek incelemeler yapılmıştır ve buna bağlı olarak **dinamik iletkenlik** parametresi tarif edilmiştir. Bu sayı hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün çarpımına eşittir:

$$\text{Dinamik İletkenlik}(T_D) = \text{Hidrolik İletkenlik}(k) * \text{Hidrolik Yük}(h)$$

3.2 Hidrolik Eğim

Yeraltı suyu hesaplamalarında akifer özelliklerinin ve akımın hızının yanı sıra hidrolik büyüklükler de önemli rol oynar. Ortalama deniz seviyesi veya herhangi bir referans noktasından yeraltı su seviyesine kadar olan düşey mesafeye, hidrolik yük, hidrolik yükseklik veya piezometre seviyesi denir. Bir akiferde farklı iki noktada ölçülen yeraltı su seviyeleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir doğru ile birleştirilirse, bunun yatayla yapacağı açıya hidrolik eğim adı verilir. Bu iki nokta arasındaki hidrolik yük değerlerinin eşit olması durumunda hidrolik eğim sıfır olur ve bu iki nokta arasında su hareketinin olmadığı sonucuna varılır. Eğimin sıfırdan farklı olması, hidrolik yük değerlerinin farklı olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla büyük hidrolik yük değerine sahip olan noktadan küçük olana doğru bir su hareketi oluşur. Bu iki nokta arasındaki yük farkı Δh ve iki nokta arasındaki yatay mesafe Δr ile gösterilirse hidrolik eğim, hidrolik yük farkının mesafeye oranı olarak



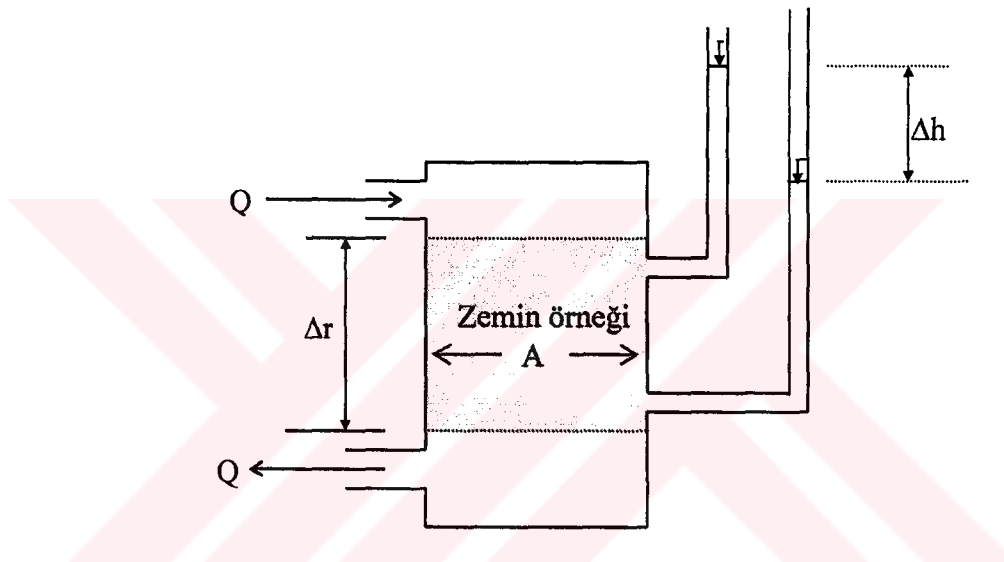
Şekil 3.1. Hidrolik eğim

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta r} \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanır. Bu ifade, hidrolik eğimin boyutsuz olduğunu gösterir. Hidrolik eğim akifer içerisinde istenen herhangi iki noktanın hidrolik yüklerinin bilinmesi ve aradaki mesafenin ölçülmesi suretiyle belirlenir. Dolayısıyla yeraltı suyu alanı içerisinde sonsuz sayıda hidrolik eğim değeri mevcuttur. Hidrolik eğim yeraltı suyu hareketinin açıklanmasındaki en önemli parametrelerden birisidir. Boşluklar arasındaki bağlantı ne kadar fazla ise yeraltı suyu hareketi o kadar kolay ve hidrolik iletkenlik katsayısı da o kadar büyük olur.

3.3 Darcy Kanunu

Darcy (1856) doymun ortamlardaki yeraltı suyu hızını ve akışını incelemek için Şekil 3.2’de gösterilen deney düzeneğini kurmuştur.



Şekil 3.2 – Darcy cihazı kısımları

Darcy, akifer malzemesinin homojen ve izotrop olduğunu kabullenerek akış doğrultusunda geçen toplam yeraltı suyu debisinin, iki kesit arasındaki hidrolik eğimle doğru orantılı olduğunu deneysel olarak tespit edebilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında, aşağıdaki ifade elde edilmiştir:

$$\frac{Q}{A} = k \frac{dh}{dr} = kI \quad (3.2)$$

Burada Q , hacim olarak A alanına sahip kesite dik geçen suyun debisini, k hidrolik iletkenlik olarak bilinen orantılılık katsayısını, $\frac{dh}{dr}$ ise hidrolik eğimi göstermektedir.

Burada, debinin kesitsel alana oranı, özgül debi olarak da adlandırılmaktadır. Özgül

debi hız boyutunda olup, birim alandan geçen debi olarak tanımlanabilir. Darcy deneyinin amacı hidrolik iletkenlik katsayısının değerini tespit etmektir. Darcy Kanunu'nun en önemli özelliği, doğrusal bir ilişki olmasıdır. Bu kanun, yeraltı suyu hareketi hesaplamalarında ve öngörülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir yeraltı kuyusunun hemen civarında hidrolik eğim çok büyük olduğundan, akım laminar değil türbülanslı haldedir. Aynı durum, kısmen akifere giren kuyulara doğru olan düşey akımın tesiri ile de ortaya çıkar.

Darcy Kanunu'na göre pratikte karşılaşılan küçük hızlar için kinetik enerjinin bir önemi yoktur. Kuyu civarında ise yüksek hızların ortaya çıkacağı açıktır. Ortam iri danelerden, çatlaklardan veya karstik boşluklardan meydana geliyorsa, yeraltı suyu akım hızı ince daneli ortamlara göre daha kolay tespit edilebilir. Permanan olmayan akım halinde önemli değişkenler olan, zaman ve sıvı yoğunluğu için açık ifadelerin yokluğu, Darcy Kanunu'nun bir eksikliğidir. Gözenekli ortamda laminar permanan akım için Darcy Kanunu'nun yetersiz olduğu, Laushey ve Popat (1978) tarafından gösterilmiştir.

Atalet kuvvetleri önemli hale geldikçe ve hız farkı oluşukça, verilen hız değeri ve Darcy Kanunu ile tahmin edilen değer farklı çıkmaktadır (Dudgeon ve Yuen 1970). İnce danelerin bulunduğu yerde, yüksek hızlar oyulmalara sebep olmakta, yük kaybı değerleri yükselmekte, hızların artması türbülansın gelişmesini hızlandırmaktadır. Değişik kaynaklardan elde edilen deneysel verilere göre, Darcy'nin doğrusal kanununun uyuşmadığı alt ve üst sınırlarının olduğu görülmektedir (Dudgeon 1964, Kutilek 1969, Slepicka 1961, Swartzendruber 1969, Wilkinson 1956).

Darcy Kanunu'nun geçerlilik sınırını saptamak için hem deneysel hem de teorik bir çok çalışma yapılmıştır. Bunların sonuçları şu şekilde özetlenebilir (Şen, 1995):

- 1) Darcy Kanunu'nun geçerli olmadığı üst limitlerin ortaya çıkmasından sonra, başlangıç terimlerinin önemli hale geldiği zamanlarda, Navier-Stokes denklemlerinin kullanımı uygundur,
- 2) Türbülans başlangıcı ile doğrusal akımların geçerli olmadığı durumlarının görülmesi, kılcal tüplerde yapılan analogi ile gösterilmiştir,
- 3) Slepicka (1961) tarafından yapılan boyutsuzluk analizleri ile doğrusal akımın geçerliliği reddedilmektedir,

- 4) İstatistiksel modellerin uygulanması ile gözenekli ortamdaki su akımı gelişigüzel yürüme (random walk) yaklaşımı ile modellenebilir. Basitleştirilmiş yöntem, Darcy Kanunu'na denk olan doğrusal ifadenin türetilmesine izin vermiştir. Aksi takdirde Darcy akımından sapmalar gözlenmiştir.

3.4 Doğrusal Olmayan Yeraltı Suyu Akımı

Darcy Kanunu'na göre, düşünülen yeraltı suyu akımları önemli bir atalet etkisine sahip değildir. Bunun sonucu olarak da, hız-hidrolik eğim ilişkisinde yakınsaklık, ıraksaklık ve kıvrımlı akış yolları herhangi bir karmaşıklığa sebep olmaz. Bununla birlikte kuyu çevresinde atalet etkilerinin artması ve türbülanslı akım ortaya çıkması olasılığı, hız-hidrolik eğim ilişkisinin doğrusal olma özelliğini değiştirir. Genelde, küçük çaplı kuyuların yakınlarında hidrolik iletkenliğin artmasına ek olarak, hidrolik eğimin de artmasından dolayı kuyuya doğru hızlı bir artış olur. Bu, Darcy Kanunu'ndan sapmaları göstermektedir. Radyal toplanmadan dolayı kuyuya doğru kesitsel alan azalır ve böylece özgül debi artar. Hidrolik eğim, Darcy Kanunu'nun tahmin ettiğinden daha yüksek bir değere ulaşır. Bu kuyunun yakınlarında akiferin belli bir kısmında doğrusal olmayan akımlar oluşabilir (Şen, 1988a). Kritik kuyu yarıçapı, ana kuyunun merkezi ile, Darcy Kanunu'ndan ilk olarak sapmaların başladığı akiferdeki ortak merkezli daire üzerinde bulunan kritik nokta arasındaki radyal mesafe olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, kritik çap ile çevrelenmiş akifer alanında doğrusal olmayan akım etkindir.

Akım ve akifer özelliklerine ait veriler verildiğinde kritik yarıçapın tahmini, sabit pompaj debisi Q ile kritik yarıçaptaki r_c , akifer debisinin eşitlenmesi ile elde edilebilir. Permanan durum göz önüne alındığında,

$$Q = 2\pi r_c m q_c \quad (3.3)$$

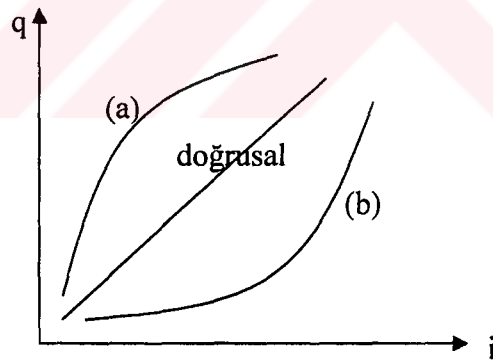
olur. Burada q_c de kritik özgül debiyi göstermektedir. Özgül debi, akiferde, hidrolik iletkenliğin fonksiyonu olan yeraltı suyu hızına bağlıdır.

Yeraltı suyu akımında $\left(Re = \frac{q \cdot d}{\nu} \right)$ Reynolds sayısını da hesaba katarak aşağıdaki ifade elde edilebilir (Albertson ve diğ., 1960).

$$r_c = \frac{\left(\frac{Q}{m}\right) d}{2\pi \nu (Re)_c} \quad (3.4)$$

Burada $(Re)_c$ kritik Reynolds sayısını, (Q/m) oranı akiferin özgül debisini ve ν de suyun kinematik viskozitesini göstermektedir. Bir akiferde, d ortalama dane çapı ve m akiferin kalınlığı sabit terimlerdir. Buradan, debinin doğrudan hidrolik iletkenliğin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir. Kuyu etrafında hidrolik iletkenliğin değişmesi, kritik yarıçapı da artırabilir.

Daha önce de bahsedildiği gibi, Darcy Kanunu yeraltı suyu akım problemlerinin tümüne uygulanamaz. Ya türbülanslı akıma yol açan akım özelliklerinden ya da çatlaklı ve karstik boşluklu ortamlar gibi akiferi oluşturan malzemeden dolayı doğrusal akımdan sapmalar meydana gelir. Düşük özgül debilerde doğrusal kanun geçerli olduğu halde, özellikle yüksek hızlarda, doğrusal ilişkiden büyük sapmalar gözlenir. Bu sapmalar, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi (a) ve (b) eğrileri tarzında olabilir (Givan, 1934; Engelund, 1953 ve Basak 1977). Atalet kuvvetlerinde meydana gelen dereceli artışların, doğrusal akımda sapmalar oluşturmamasından dolayı doğrusal akımdan türbülanslı akıma geçiş esnasında ortaya çıkan durum (a) eğrisi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gözenekli ortamda beklenen doğrusal ve doğrusal olmayan piyezometrik eğim-özgül debi ilişkisi

Darcy (1856)'de, deneysel çalışmalarının bir çoğunda, özgül debi-hidrolik eğim ile doğrusal olarak değişim gösteren kanununa uymadığını gözlemlemiştir. Ancak ortalama zamanda, yaklaşık olarak 0.1 m/s'lik bir değere sahip özgül debi cinsinden bir üst limitin olduğu kanısına varmıştır. Hidrolik parametrelerdeki herhangi bir artış, akiferin bütününde doğrusal olmayan bir akıma sebep olacaktır. Örneğin, iri daneli,

gözenekli ve çatlaklı ortamda yüksek hidrolik iletkenlikten dolayı yeraltı suyu hızı türbülanslı olabilir (Givan, 1934; Engelund, 1953 ve Basak 1977). Çatlaklı ortamda özgül debi ile hidrolik iletkenlik arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin olduğu Louis (1969), Snow (1968) ve Maini (1971) tarafından belirtilmektedir.

3.5 Permanan Akım

Bir yerde, yeraltı suyu hızının yönü ve doğrultusu zamanla değişmiyor ise buna permanan akım adı verilir. Böyle bir durumda, akım ile eşpotansiyel çizgilerinin durumu önemli bir süre zamanla değişmez. Bu şartlarda, yeraltı suyu seviyesi de zamanla değişmez. Değişmezliğin zaman süresi, duruma göre az veya çok olabilir. Akım ağının sabit kalması, yeraltı suyu hidrolik eğiminin de sabit kaldığını gösterir. Doygun bölge kalınlığı da bu durumda sabit kalır. Bunun sonucunda, herhangi bir enkesitte hidrolik eğim, enkesit alanı ve hızlar zamanla değişmez ve böylece debi de sabit kalır. İki ardışık kesit alınıp bunların da permanan şartlar altında olduğu düşünülürse, bir kesitteki debinin diğerine eşit olduğu sonucu çıkar. Bir farklılığın olması durumunda, yeraltı suyunun depolama hacminde artış veya azalış olur. Buradan, permanan akım halinin önemli bir sonucu olarak; giriş debisinin çıkış debisine eşit olduğu anlaşılır. Bu durum, yeraltı haznesinden çekilen miktar kadar sürekli bir girdinin olması ile mümkündür. Bunun ötesinde, permanan akım halinde yeraltı su seviyesinde bir değişiklik olmaz. Tabiatta bu durumları gözlemek oldukça zordur.

Dairesel bir adanın etrafını su sarmış olması durumunda, adada açılan bir kuyudan çekilen debi kadar suyun, civardan yeraltı suyu haznesine girmesi ile bir denge tesis edilebilir. Bu durumda, giren debi çıkan debiye eşittir ve akım permanandır. Basıncsız (serbest yüzeyli) akiferlerde yağış ve yüzey akışlarından sızan suların ilavesi ile çekilen su kadar hazneye beslenme olacak bir denge durumu elde edilebilir. Bu denge durumundaki yeraltı suyuna, permanan yeraltı suyu akımı adı verilir. Bir akifere giren ve çıkan su miktarları arasında dengenin bulunamaması veya tesis edilememesi hallerinde permanan olmayan akım söz konusudur. Tabiattaki tüm yeraltı suyu akımları, hareketlerinin çok yavaş olması nedeniyle permanan olmayan türdedir. Hidrolojik çevrimin dinamikliği (zaman ve konumla olan sürekli değişimleri) permanan olmayan yeraltı suyu hareketine sebep olur.

4. DEĞİŞEN HİDROLİK İLETKENLİKLİ AKİFERLERDE YERALTI SUYU AKIMI

4.1 Giriş

Yeraltı su akımının meydana gelmesinde, hidrolik yükün yanı sıra gözenekli ortamdaki bazı değerlerin farklılık göstermesinin de etkin olduğu, çok sayıdaki deneysel ve teorik bilgilerle günümüzde teyit edilmiştir. Örneğin sıcaklık farklılığının var olması, hidrolik eğim olmasa bile yeraltı suyu akışına sebebiyet verebilir (Gurr ve diğ., 1952; Philip ve de Vries, 1957). Bu şartlar, yeraltında donmuş parçacıkların ortaya çıkmasında da etkilidir (Hoekstra, 1996; Harlan, 1973). Bir toprak akımı içinde oluşturulan elektriksel farklılık, yüksek voltajdan düşük voltaja doğru bir su akımı meydana getirebilir.

4.2 Hidrolik İletkenlik Değişimli Akım

Önceki kısımda açıklanan ifadelerle benzer olarak yeraltı suyu akım denklemi olan akiferin hidrolik iletkenliğinin de konumla değiştiği kabulü Denklem 3.2'deki Darcy Kanunu'nun

$$V = \frac{d(kh)}{dr} \quad (4.1)$$

şeklinde yazılmasını gerektirir. Burada k, hidrolik iletkenlik mesafe ile değiştiği düşünüldüğünden diferansiyelin içine alınmıştır. Parantez içindeki ifade dinamik iletkenlik sayısı olarak tanımlanmıştır. Buna göre, yeraltı suyu akım hızı genel halde dinamik iletkenlik katsayısının mesafe ile değişimi olarak tanımlanır. Bu yeni hız formülasyonu ile akiferde hidrolik iletkenliğin ve piezometre seviyesinin mesafe ile değişimleri göz önüne alınabilir. Böyle bir tanım klasik doğrusal Darcy Kanunu'nu doğrusal olmayan yeraltı suyu kanununa dönüştürür. Denklem 4.1 r'ye göre türetilirse,

$$V = k \frac{dh}{dr} + h \frac{dk}{dr} \quad (4.2)$$

hız ifadesi elde edilir. Burada ilk terim, klasik Darcy Kanunu'na karşılık gelirken ilave olarak gelen ikinci terim ise hidrolik iletkenliğin değişiminden dolayı akımın yeraltı suyu hızına olan katkısını gösterir. Bu ifade en genel halde hem hidrolik iletkenlik hem de hidrolik yükün değişmesi durumunu yansıtmaktadır. Klasik Darcy Kanunu'nun Denklem 4.2'nin özel durumu olduğu söylenebilir. Yani hidrolik iletkenlik $k(r) = k_c = \text{sabit}$ olması durumunda Denklem 4.2, Denklem 3.2'ye indirgenmiş olur.

4.3 Dinamik İletkenlik

Analitik ve pratik olarak yapılan çalışmaların büyük çoğu, yeraltı suyu akım hızının hidrolik eğim ile doğrusal olarak değiştiği ve ortamın hidrolik iletkenliğinin değişmediği kabulüne dayanmaktadır (Denklem 3.2). Bu ifade, değişimin sadece piyezometrik eğime bağlı olduğunu göstermektedir. Halbuki, doğada hidrolik iletkenlikteki yersel değişimler, yeraltı suyu hızının değişimine de sebep olmaktadır. Bu tezde Darcy Kanunu, hem hidrolik yük (piyezometrik seviye) hem de hidrolik iletkenlikteki değişimleri içerecek şekilde ele alınmıştır. Bu amaçla, T_D dinamik iletkenlik parametresi, k hidrolik iletkenlik ile, h piyezometrik yükünün çarpımı olarak tanımlanacaktır.

$$T_D = k h \quad (4.3)$$

Tüm yeraltı suyu çalışmalarında klasik olarak, statik denilebilecek iletkenlik katsayısı ise benzer olarak,

$$T = k_c m \quad (4.4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, m sabit akifer kalınlığını göstermektedir.

Genel olarak, yeraltı suyu hızı Denklem 4.1'deki gibi ifade edilebilir:

$$V = \frac{d(kh)}{dr}$$

şeklindeki bir hız tanımı, $k = k(r)$ olarak ele alındığından doğrusal olmayan bir hareketi temsil eder. Bu sebepten, Denklem 4.1'e doğrusal olmayan Darcy Kanunu'dur denilebilir. Burada $k = k_c$ sabit kabul edilirse aşağıdaki klasik Darcy Kanunu elde edilir:

$$V = k \frac{dh}{dr} \quad (4.5)$$

Yeraltı suyu hareketi için hidrolik eğim sıfırdan büyük olmak zorundadır:

$$\frac{dh}{dr} > 0 \quad (4.6)$$

Bu ise, hidrolik eğimin eşik değerinin sıfır olduğunu ifade eder. Eşitsizliğin her iki tarafı radyal mesafe artımı dr ile çarpıldığında, $dh > 0$ olur. H , başlangıç piyezometre seviyesinden herhangi bir h yüküne kadar entegre edildiği zaman, $h - H < 0$ veya

$$\frac{h}{H} < 1 \quad (4.7)$$

elde edilir. Yeraltı suyu hareketi için gerekli eşik değeri, $h = H$ olduğu zamandır. Buradan, eşik değeri hidrolik iletkenlik gibi herhangi bir akifer özelliğinden bağımsızdır sonucu çıkartılabilir. Bununla birlikte, daha sonra açıklanacağı gibi doğrusal olmayan yeraltı suyu akımında eşik değeri akifer özelliğinden bağımsız değildir. Bu durum Denklem 4.2’de de ifade edildiği gibi eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim, hidrolik yük (piyezometrik seviye) değişimlerinin ve ikinci terim ise hidrolik iletkenlik değişiminin yeraltı suyu hızına katkısını gösterir.

Denklem 4.2’den de anlaşılacağı gibi, piyezometrik seviyenin yatay olması ($dh/dr = 0$) durumunda dahi hidrolik iletkenlik farkından dolayı yeraltı suyu hareketi olacaktır. Bu durumda hız ifadesi, matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V = h \frac{dk}{dr} \quad (4.8)$$

Aslında yeraltı suyu hareketi, Denklem 4.5 ve Denklem 4.8’de ifade edilen iki durum arasında veya ikisinin süperpozisyonuyla meydana gelir. Yeraltı suyu akımının ortaya çıkması için, $V > 0$ olmalıdır. Buna göre, Denklem 4.2 aşağıdaki şekle dönüşür:

$$k \frac{dh}{dr} + h \frac{dk}{dr} > 0 \quad (4.9)$$

başka bir şekilde bu ifade

$$\frac{dh}{dr} > -\left(\frac{h}{k}\right)\frac{dk}{dr} \quad (4.10)$$

olarak yazılabilir. Buna göre yeraltı suyu hareketi için eşik değeri, akifer özelliğinin bir fonksiyonu olan hidrolik iletkenlikle ifade edilen eşitsizliğin sağ tarafındaki terime eşittir. Hidrolik iletkenlik sabit iken ($k = \text{sabit}$) Denklem 4.10, Denklem 4.6'ya dönüşür.



5. MESAFE DEĞİŞİMLİ HİDROLİK İLETKENLİK

5.1 Giriş

Bu tezin amacı, permanan akım halinde kuyu çevresinde mesafe ile değişen hidrolik iletkenlik şartı göz önünde bulundurularak akifer parametrelerini akifer sınamaları ile tayin edebilmek için yeni yöntemler sunmaktır. Basınçlı bir akiferdeki kuyular etrafında hidrolik iletkenlik değişiminin, radyal uzaklığın fonksiyonu olarak, doğrusal (lineer) ve üstel (eksponansiyel) şekilde azaldığı düşünülecektir. Basınçlı akiferlerde permanan akım durumu formüllerinin, ana kuyudan itibaren hidrolik iletkenliğin doğrusal ve üstel değişimi için yeniden çıkarılması hedeflenmektedir. Bu yaklaşımların her biri, özel çözüm olarak klasik yaklaşımların formülasyonlarını vermektedir.

Çalışma, iki aşamadan ibarettir. Bunlar, hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün, birbirinden bağımsız ve bağımlı durumları için akifer parametrelerini belirleyen yeni bağıntıların çıkarılması ve yorumlanarak, mevcut bağıntılarla karşılaştırılmasıdır. Bu iki durum için kendi içlerinde de karşılaştırma yapılacaktır.

5.2 Genel Yaklaşım

5.2.1 Doğrusal iletkenlik değişimi

Yeraltı suyu hareketini, Denklem 4.10'daki gibi değerlendirmek için, hidrolik iletkenliğin mesafeye göre değişiminin bilinmesi gereklidir. Bunun için, hidrolik iletkenliğin doğrusal olarak değiştiği durumda hipotetik model şu şekilde tanımlanabilir:

$$k(r) = k_c - \alpha r \quad (5.1)$$

Burada k_c , kuyu cidarındaki sabit hidrolik iletkenliği, $\alpha > 0$ ise azalma oranını gösteren bir sabittir ve T^{-1} boyutunda olup ters zaman faktörü olarak adlandırılır. Böylece, Denklem 4.9 yukarıdaki ifade de hesaba katılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$(k_c - \alpha r) \frac{dh}{dr} - \alpha h > 0$$

Bu ifade daha sade hale getirilirse,

$$\frac{dh}{h} - \frac{\alpha}{k_c - \alpha r} dr > 0 \quad (5.2)$$

şeklini alır. Bunun $r \rightarrow R$ için $h \rightarrow H$ sınır şartı da göz önünde tutularak entegre edilmesi ile

$$\int_h^H \frac{dh}{h} - \int_r^R \frac{\alpha}{k_c - \alpha r} dr > 0$$

aşağıdaki çözüme ulaşılır.

$$\frac{h}{H} < \frac{k_c - \alpha R}{k_c - \alpha r} \quad (5.3)$$

Denklem daha sade hale getirilirse,

$$\frac{h}{H} < \frac{(1 - \frac{\alpha}{k_c} R)}{(1 - \frac{\alpha}{k_c} r)} \quad (5.4)$$

elde edilir. Bundan sonra

$$f = \frac{\alpha}{k_c} \quad (5.5)$$

$$\gamma_r = f r \quad \text{ve} \quad \gamma_R = f R \quad (5.6)$$

γ_r : Boyutsuz doğrusal radyal mesafe,

γ_R : Boyutsuz doğrusal tesir mesafesi tanımları yapılarak, denklem daha sade hale getirilirse,

$$\frac{h}{H} < \frac{(1 - \gamma_R)}{(1 - \gamma_r)} \quad (5.7)$$

bulunur.

$f = \frac{\alpha}{k_c}$ büyüklüğü “ters mesafe faktörü” olarak adlandırılabilir ve boyutu $[L^{-1}]$ ’dir;

bu faktör sıfır ile sonsuz arasında değerler alabilir. Sabit hidrolik iletkenlik için $f = 0$

olur ve böylece, Denklem 5.7, Denklem 4.7'ye dönüşür. Diğer yandan, Denklem 5.7'den, yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin, $\frac{(1-\gamma_R)}{(1-\gamma_r)}$ hiperbolik bir fonksiyon olacağı anlaşılır. Buda akiferde doğrusal olmayan bir akımın meydana geleceği anlamını taşır.

5.2.2 Üstel iletkenlik değişimi

Hidrolik iletkenliğin diğer bir hipotetik ifadesi, üstel azalış şeklinde olabilir:

$$k(r) = k_c e^{-\beta r} \quad (5.8)$$

Burada k_c , kuyu cidarındaki sabit hidrolik iletkenliği, $\beta > 0$ ise azalma oranını gösteren bir sabittir ve L^{-1} boyutunda olup ters mesafe faktörü olarak adlandırılır. Denklem 5.8 Denklem 4.9 ile birlikte kullanılırsa aşağıdaki ifade

$$\frac{dh}{h} - \beta dr > 0 \quad (5.9)$$

elde edilir. Bunun $r \rightarrow R$ için $h \rightarrow H$ sınır şartı göz önünde bulundurularak entegre edilmesi ile

$$\int_h^H \frac{dh}{h} - \beta \int_r^R dr > 0$$

aşağıdaki çözüme ulaşılır:

$$\frac{h}{H} < e^{-\beta(R-r)} \quad (5.10)$$

denklem daha sade hale getirilirse,

$$\frac{h}{H} < e^{-\beta R + \beta r} \quad (5.11)$$

elde edilir. Burada,

$$u_r = \beta r \quad (5.12)$$

$$u_R = \beta R \quad (5.13)$$

u_r : Boyutsuz üstel radyal mesafe

u_R : Boyutsuz üstel tesir mesafesi tanımları yapılarak denklem daha sade hale dönüştürülürse,

$$\frac{h}{H} < e^{u_r - u_R} \quad (5.14)$$

şeklini alır. Bu ifade, $\beta=0$ için Denklem 4.7'deki Darcy yeraltı suyu akımına dönüşür. Denklem 5.14, yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin aynı zamanda hidrolik iletkenliğe de bağlı olduğunu göstermektedir. Bunun yanında yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin, $e^{u_r - u_R}$ üstel bir fonksiyon olacağı anlaşılır ve akiferde doğrusal olmayan bir akımın meydana geleceği anlamını taşır.

5.3 Bağımsız Durum

Bağımsız durumda, hidrolik iletkenliğin hidrolik yükten bağımsız olarak değiştiği göz önüne alınarak, yeraltı suyu kuyusuna gelen debi Q , m kalınlığındaki akifer içinde kuyudan r radyal uzaklığındaki silindirik yüzeyin yanal alanı ile $V(r)$ yeraltı suyu hızının çarpımı

$$Q = 2\pi r m V(r) \quad (5.15)$$

olarak tanımlanır. Bu tezde, genelleştirilmiş olarak düşünülen Darcy (1856) kanununa göre $V(r)$ yeraltı suyu akım hızı;

$$V(r) = -k(r) \frac{ds}{dr} \quad (5.16)$$

bağıntısı ile tanımlanacaktır. Burada r radyal mesafeyi, s ise düşümü ifade etmekte olup bu bölümdeki hesaplamalarda “düşüm” ile çalışılacaktır. Halbuki, Darcy'nin ilk teklifinde hidrolik iletkenlik $k(r) = k$ şeklinde sabit kabul edilerek, mesafe ile olabilecek değişimler göz ardı edilmiştir. Bu değişimlerin etkileri incelenerek yeni ve genelleştirilmiş yeraltı suyu yaklaşımları ele alınacaktır. Tezde bu hedefe ulaşabilmek için, hidrolik iletkenliğin radyal mesafe ile değişimi, sırası ile önce doğrusal sonra da üstel olarak aşağıdaki ifadelerle göz önünde tutulacaktır:

$$k(r) = k_c - \alpha r \quad (5.17)$$

$$k(r) = k_c e^{-\beta r} \quad (5.18)$$

Bağıntılarda, k_c kuyu cidarındaki hidrolik iletkenliği, $\alpha \geq 0$ ve $\beta \geq 0$ ise hidrolik iletkenliğin azalma oranını gösteren sabitlerdir. Daha önce yeraltı suyu literatüründeki tüm yaklaşımlarda $\alpha = 0$ ve $\beta = 0$ halleri, yani hidrolik iletkenliğin kuyudan itibaren değişmediği göz önünde tutularak incelemeler yapılmıştır. Burada α , T^{-1} boyutunda olup ters zaman faktörü olarak, β ise L^{-1} boyutunda olup ters mesafe faktörü olarak adlandırılmıştır.

5.3.1 Doğrusal iletkenlik değişimi

Denklem 5.17'de verilen değişim ele alındığında, tanımda görüldüğü üzere hidrolik iletkenliğin radyal mesafe ile doğrusal değiştiği düşünülmektedir. Doğal akiferlerde α 'nın değeri çok küçük olabilir. Bu durum, kuyudan itibaren hidrolik iletkenliğin mesafeyle çok küçük değişim gösterdiği anlamına gelir. $\alpha = 0$ durumunda hidrolik iletkenlik değişmemektedir. Doğrusal olarak değişim gösteren 5.17 numaralı ifade, 5.16 numaralı denklemde yazılıp 5.15 numaralı denklem ile birlikte kullanılırsa,

$$Q = -2\pi m r (k_c - \alpha r) \frac{ds}{dr} \quad (5.19)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemelerin yapılması ile,

$$\frac{Q}{2\pi m r (k_c - \alpha r)} dr = -ds \quad (5.20)$$

şeklini alır. Bu denklem entegre edilirse,

$$\frac{Q}{2\pi m} \int_r^R \frac{dr}{r(k_c - \alpha r)} = - \int_s^0 ds \quad (5.21)$$

halini alır.

Burada $R > r$ 'ye karşılık $s(R) < s(r)$ olmaktadır. Bu ifade, radyal mesafe ile düşüm arasında ters bir ilişki olduğunu gösterir. Ana kuyudan itibaren belli bir radyal mesafede düşüm sıfıra eşit olmalıdır. Bu mesafe, tesir yarıçapı R olarak adlandırılır. Tesir yarıçapının tarifi dikkate alındığında $r = R$ tesir mesafesinde $s(R) = 0$ olur. Bunun anlamı, kuyunun tesir yarıçapında düşümün sıfıra eşit olmasıdır.

5.21 numaralı denklemin integral çözümüne devam edilirse,

$$s = \frac{Q}{2\pi m k_c} \ln \left[\frac{R}{r} \frac{k_c}{k_c} \left(\frac{1 - \frac{\alpha}{k_c} r}{1 - \frac{\alpha}{k_c} R} \right) \right] \quad (5.22)$$

elde edilir. Burada f , ters mesafe faktörü olarak,

$$f = \frac{\alpha}{k_c} \quad (5.23)$$

şeklinde tanımlanır. T ve f parametreleri 5.22 numaralı denklemde yerine konulursa,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left[\frac{R}{r} \left(\frac{1 - f r}{1 - f R} \right) \right] \quad (5.24)$$

şeklini alır. Daha sonra,

$$\gamma_r = f r \quad \text{ve} \quad \gamma_R = f R \quad (5.25)$$

γ_r : boyutsuz doğrusal radyal mesafe, γ_R : boyutsuz doğrusal tesir mesafe tanımları yapılarak denklem daha sade hale getirilirse,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left[\frac{R}{r} \left(\frac{1 - \gamma_r}{1 - \gamma_R} \right) \right]$$

veya

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{R}{r} + \ln \left(\frac{1 - \gamma_r}{1 - \gamma_R} \right) \right] \quad (5.26)$$

olur. Burada x , boyutsuz mesafe oranı,

$$x = \frac{r}{R} \quad (5.27)$$

olarak tanımlanırsa ve bu ifade Denklem 5.26'da yerine yazılırsa,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{1}{x} + \ln \left(\frac{1 - \gamma_r}{1 - \gamma_R} \right) \right] \quad (5.28)$$

permanan akım için genel çözüm elde edilmiş olur. Bundan sonra elde edilen genel

çözümü boyutsuzlaştırmak için denklemin her iki tarafı $\frac{2\pi T}{Q}$ ile çarpılırsa,

$$\frac{2\pi T}{Q} s = \ln \frac{1}{x} + \ln \left(\frac{1-\gamma_r}{1-\gamma_R} \right) \quad (5.29)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca ifadenin sağ tarafında kalan kısım,

$$W(\gamma_r, \gamma_R, x) = \ln \frac{1}{x} + \ln \left(\frac{1-\gamma_r}{1-\gamma_R} \right) \quad (5.30)$$

boyutsuz kuyu fonksiyonu olarak tanımlansın. Bundan sonra, γ_r ve γ_R boyutsuz sayıları birbirine oranlanırsa (5.25) bağıntısı ve (5.27) tanımı kullanılırsa

$$\gamma_r = x \gamma_R \quad (5.31)$$

elde edilir. Bu ifade, 5.29 numaralı denklemde yerine konulursa,

$$W(\gamma_R, x) = \ln \frac{1}{x} + \ln \left(\frac{1-x\gamma_R}{1-\gamma_R} \right) \quad (5.32)$$

şeklini alır. Bu ifade γ_R ve x 'e bağlı boyutsuz bir fonksiyondur. Dolayısı ile 5.29 numaralı denklem,

$$\frac{2\pi T}{Q} s = W(\gamma_R, x) \quad (5.33)$$

şeklini alır veya

$$T = \frac{Q}{2\pi s} W(\gamma_R, x) \quad (5.34)$$

olur. 5.34 numaralı denklem yardımıyla kuyu fonksiyonu, debi ve düşüm değerlerinin bilinmesi durumunda, T iletim kapasitesinin değeri de belirlenmiş olur. Bu yaklaşımda, üç tane akifer parametresinin bulunması amaçlanmaktadır. Bunlar T , α ve R değerleridir. Bu parametrelerin bulunması için akifere ait düşüm-mesafe verileri ve tip eğri çift-logaritmik eksen üzerinde çizilerek çakıştırma yöntemi uygulanacaktır. Çakıştırma yönteminin nasıl yapılacağı ilerdeki bölümde ele alınacaktır.

5.3.2 Üstel iletkenlik değişimi

Üstel değişimi gösteren 5.18 numaralı denklem 5.16 numaralı denklemde yazılıp 5.15 numaralı denklem ile birlikte kullanılırsa,

$$Q = -2\pi m r k_c e^{-\beta r} \frac{ds}{dr} \quad (5.35)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenerek,

$$\frac{Q e^{\beta r}}{2\pi m k_c r} dr = -ds \quad (5.36)$$

halini alır. Bu son ifade tesir yarıçapı olan R mesafesine kadar entegre edilirse,

$$\frac{Q}{2\pi m k_c} \int_r^R \frac{e^{\beta r}}{r} dr = \int_s^0 -ds \Rightarrow s = \frac{Q}{2\pi m k_c} \int_r^R \frac{e^{\beta r}}{r} dr \quad (5.37)$$

ifadesi elde edilir. Bağlantıda

$$T = m k_c \quad (5.38)$$

T , iletim kapasitesi ve u_r , boyutsuz radyal mesafe tanımları yapılırsa,

$$u_r = \beta r \quad (5.39)$$

elde edilir. Denklem 5.37 değişken değiştirme yöntemi kullanılarak,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \int_r^R \frac{e^u}{u} du \quad (5.40)$$

şeklini alır. Bu ifadenin sağ tarafındaki entegral kısmı,

$$W(r, R) = \int_r^R \frac{e^u}{u} du \quad (5.41)$$

boyutsuz kuyu fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Denklem 5.41'deki entegralin sınırları, Denklem 5.39 kullanılarak,

$$r = \frac{u_r}{\beta} \text{ ve } R = \frac{u_R}{\beta} \quad (5.42)$$

olarak dönüştürülürse,

$$W(u_r, u_R) = \int_{u_r}^{u_R} \frac{e^u}{u} du \quad (5.43)$$

elde edilir. Bu entegralin çözümünün açık şekli sonsuz bir seri olarak,

$$W(u) = \left[\ln u + u + \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} + \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right] \quad (5.44)$$

şeklinde yazılır (Ayres, 1990). Entegralin alt u_r ve üst u_R sınırları 5.44 numaralı ifadede yerine yazılarak ve u^4 ile daha büyük üslü terimler ihmal edilerek

$$W(u_r, u_R) = \left[\ln u_R + u_R + \frac{u_R^2}{2.2!} + \frac{u_R^3}{3.3!} \right] - \left[\ln u_r + u_r + \frac{u_r^2}{2.2!} + \frac{u_r^3}{3.3!} \right] \quad (5.45)$$

veya

$$W(u_r, u_R) = \ln \frac{u_R}{u_r} + u_R \left[1 - \frac{u_r}{u_R} \right] + \frac{u_R^2}{4} \left[1 - \left(\frac{u_r}{u_R} \right)^2 \right] + \frac{u_R^3}{18} \left[1 - \left(\frac{u_r}{u_R} \right)^3 \right] \quad (5.46)$$

Denklem 5.39'un tanımları kullanılarak,

$$W(r, R, u_R) = \ln \frac{R}{r} + u_R \left[1 - \frac{r}{R} \right] + \frac{u_R^2}{4} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] + \frac{u_R^3}{18} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \quad (5.47)$$

bulunur. Bu seri yakınsak bir seri olduğundan ilk üç terim alınıp ve Denklem 5.27'deki ifade Denklem 5.47 'deki ifadede yerine yazılırsa,

$$W(u_R, x) = \ln \frac{1}{x} + u_R [1 - x] + \frac{u_R^2}{4} [1 - x^2] + \frac{u_R^3}{18} [1 - x^3] \quad (5.48)$$

olur. Dolayısı ile, burada tanımlanmış boyutsuz kuyu fonksiyonu olan $W(u_R, x)$ ifadesi 5.40 numaralı denklemde yerine yazılarak,

$$W(u_R, x) = \frac{2\pi sT}{Q} \quad (5.49)$$

şeklini alır. Elde edilen 5.49 numaralı denklem boyutsuz bir ifadedir. Bağlıtından T iletim kapasitesi çözülürse,

$$\boxed{T = \frac{Q}{2\pi s} W(u_R, x)} \quad (5.50)$$

elde edilir. Burada düşüm s , debi Q ve kuyu fonksiyonu $W(u_R, x)$ ile ifade edilmektedir. Bu son ifadedeki boyutsuz kuyu fonksiyonunun değerinin, debinin ve düşüm değerlerinin bilinmesiyle, T parametresinin değeri de belirlenmiş olur. Burada, akiferin üç önemli parametresinin bulunması amaçlanmaktadır. Üstel

yaklaşım için bu parametreler; iletim kapasitesi T , hidrolik iletkenliğin azalma oranı β ve tesir mesafesi olan R 'dir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için tip eğriler çizilerek çakıştırma yöntemi kullanılacaktır. Bu tip eğriler, 5.48 numaralı denklem kullanılarak elde edilecektir. Denklem 5.27'e göre boyutsuz mesafe oranı x , (0-1] aralığında değerler alarak değişecek ve boyutsuz üstel tesir mesafesi u_R 'nin farklı değerleri için tip eğriler çizilecektir. Tip eğri için, yatay ekseninde boyutsuz mesafe oranı x , dikey ekseninde ise boyutsuz kuyu fonksiyonu $W(u_R, x)$ değeri gösterilecektir. Böylece tip eğri, x ile $W(u_R, x)$ arasındaki değişimi değişik boyutsuz mesafe değerlerine göre gösteren ve u_R 'nin parametre olduğu eğriler demetidir. Dolayısı ile, permanan akım halinde, basınçlı akiferde ve tam nüfuz eden bir kuyu için arazi verileri ölçülerek akifer parametreleri olan T , β ve R tespit edilecektir. Bu parametreleri belirlemek için çakıştırma yöntemi kullanılacaktır.

5.3.3 Çakıştırma yöntemi parametre tayini

Bu eğri belirleme yöntemi, arazi verilerine en uygun olan tip eğrinin seçilmesi esasına dayanır. Genel bir kural olarak, S ve T akifer parametrelerinin tespit edilmesi için en uygun tip eğrinin belirlenmesi gerekir ve aşağıdaki boyutsuz sayılar kullanılarak hesaplama yapılır.

$$W(u) = \frac{4\pi T}{Q} s(r, t) \quad (5.51)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4tT} \quad (5.52)$$

Burada S depolama katsayısı olup; birim hidrolik yük düşmesi halinde birim alandan elde edilen su miktarıdır ve bu her ne kadar boyutsuz olarak görülüyorsa da, aslında görünmeyen bir boyuta sahiptir. Böyle bir eğri Theis, (1935) tarafından tanımlanarak

$$W(u) = \int_{-\infty}^u \frac{e^{-u}}{u} du \quad (5.53)$$

şeklinde verilmiştir. Bunun açık ifadesi;

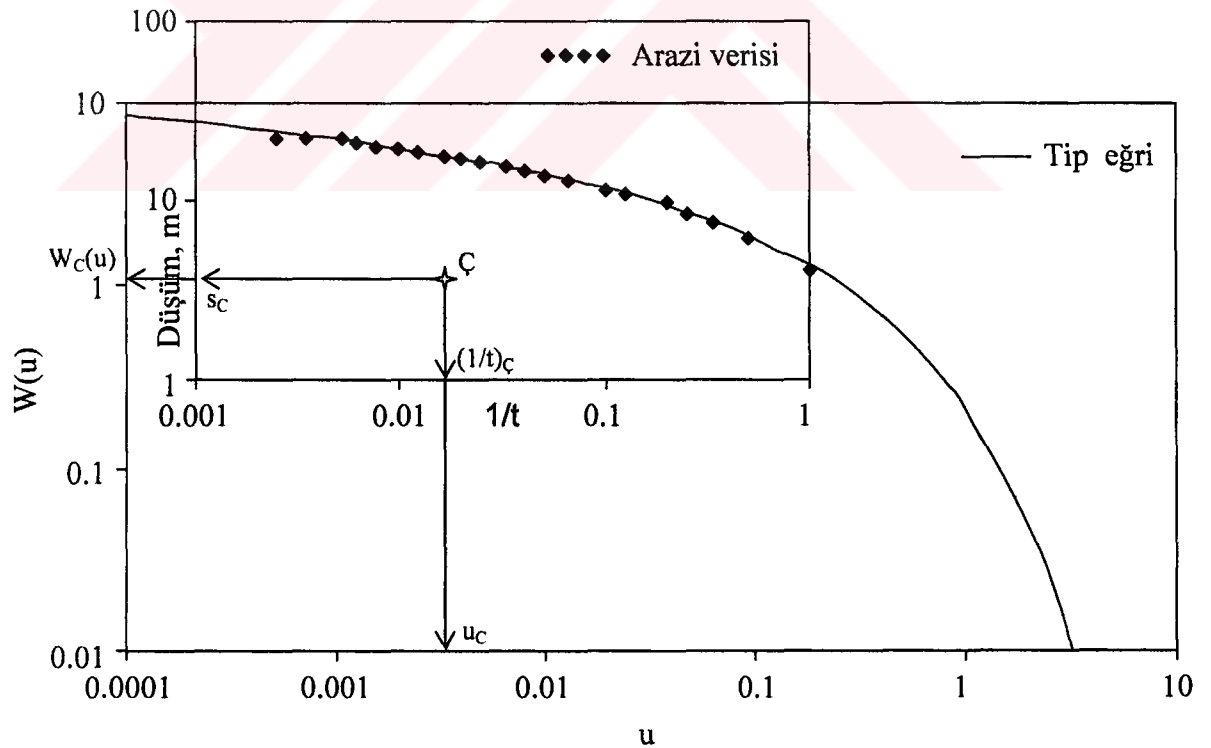
$$W(u) = -0.5572 - Lnu + u - \frac{u^2}{2.2} + \frac{u^3}{3.3} - \frac{u^4}{4.4} + \dots \quad (5.54)$$

serisi olarak verilebilir.

Burada s düşüm; statik su seviyesi ile dinamik su seviyesi arasındaki farkı, t ; zamanı ve r ise radyal mesafeyi göstermektedir. $W(u)$ ve u , sırası ile klasik Darcy çözümünün esas alan kuyu fonksiyonu ve boyutsuz zaman faktörü olarak adlandırılır. Bunlar, akifer parametrelerine bağlıdır.

Akifer parametrelerinin tespiti için eğri belirleme işlemi sırasında aşağıdaki adımlar izlenir.

- (a) Kuyu fonksiyonunun boyutsuz zaman faktörü ile değişimi, çift logaritmik kağıt üzerine, Denklem 5.54'teki boyutsuz zaman faktörü olan u 'ya değerler verilerek elde edilir. Bu şekilde ortaya çıkan u ile $W(u)$ arasındaki değişimi gösteren eğriye "tip eğri" adı verilir. Pratikte tip eğrinin şeffaf kağıt üzerine çizilmesi tercih edilir. Tip eğride düşey eksen boyunca kuyu fonksiyonu, yatay eksen de boyutsuz zaman faktörü veya tersi değerleri gösterilir. Arazi eğri verisi kağıdı ile tip eğri kağıdı, yatay ve düşey eksenleri birbirine paralel olacak şekilde üst üste getirilir. Bu iki kağıdın ortak alanları üzerindeki herhangi bir nokta seçilerek "çakıştırma noktası" olarak adlandırılır. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi çakıştırma noktasına karşı gelen $W_C(u)$, u_C , $s_C(r,t)$ ve $(1/t)_C$ değerleri okunur,



Şekil 5.1 – Tip eğri ve arazi verileri kağıtları Theis (1935) tip eğrisi

- (b) Tip eğrinin çizildiği çift logaritmik kağıdın aynı ölçekli başka bir çift logaritmik kağıt üzerine, düşey eksende düşüm $s(r,t)$ yatay ekseninde de zaman, t veya mesafe, r verileri işaretlenerek “ arazi verisi dağılımı ” elde edilir,
- (c) Tip eğri kağıdı arazi veri dağılımı kağıdı üzerine koyulup, tip eğri ile veri noktaları arasında göz ile en iyi uyum ortaya çıkana kadar eksenler birbirine paralel olacak biçimde hareket ettirilerek iki kağıt çakıştırılır. En sonunda, iki kağıt birbirine göre hareket etmeyecek biçimde sabitleştirilir,
- (d) Her iki kağıdın ortak olduğu alan üzerinde keyfi olarak bir nokta, $\checkmark$ seçilir. İşte bu noktaya çakıştırma noktası adı verilir.
- (e) Çakıştırma noktasının, tip eğri ve arazi veri dağılımı kağıtlarından yatay ve düşey eksenler üzerinden koordinat okumaları yapılır. Böylece çakıştırma noktasına karşı gelen $W_{\checkmark}(u)$, $u_{\checkmark}$, $s_{\checkmark}(r,t)$ ve $(1/t)_{\checkmark}$ değerleri elde edilir.

Genellikle tip eğri, küçük zamanlar için arazi verilerinden önemli sapmalar gösterir. Bu sapmaların sebepleri şunlar olabilir:

- (a) Matematik modelin çıkarılabilmesi için teorik olarak, kuyu çapı sıfır kabul edilmiştir. Böyle bir durum pratikte asla bulunmaz. Bunun sonucunda da, kuyudaki düşüm ile akiferdeki kuyu yüzü düşümü arasında bir fark belirlenir. Buna kuyu kaybı adı verilir. Bu gibi farklar çakıştırma işleminin küçük zamanlarında ortaya çıkan sapmalara neden olur,
- (b) Yine teorik olarak, akifer sınaması boyunca debinin sabit kaldığı kabulü vardır. Özellikle, pompanın ısınması ve işletme rejimine girmesi için zaman gerektiğinden, debinin sabit olmaması söz konusudur. Başlangıçta pompa, düşüme göre kendisini ayarlamak için uğraşır. Şen ve Altunkaynak (2004) basınçlı akiferlerde değişken debili durum için de tip eğri çözümleri yapmıştır,
- (c) Analitik ifadeler çıkarılırken yapılan kabullerden bir tanesi de, ortamın homojen olmasıdır. Genellikle kuyu açılırken, kuyu cidarındaki jeolojik kayaçlarda sıkışmalar olacağından, en azından kuyu çevresinde homojen olmama durumu söz konusudur. Bunun sonucunda, akiferde birbirinden farklı hidrolik özellikte iki kısım ortaya çıkar. Bu durum tezde ayrıntılı olarak ele alınmıştır,

- (d) Akiferdeki yeraltı suyu akımının laminar ve Darcy Kanunu'na uyduğu varsayımı yapılır. Pratikte ise kuyu cidarındaki yüksek piyezometre eğimleri dolayısı ile laminar olmayan türbülanslı akımlar ortaya çıkabilir.

Yukarıdaki maddelerde belirtilen tüm sebepler, kuyudan oldukça uzakta bulunan gözlem kuyuları için geçerli olur.

Akifer parametrelerinin tespit edilmesinde bir başka pratik yöntem de geç zaman veya uzak mesafe verilerinin yarı logaritmik (zaman veya mesafe logaritmik) kağıtta zaman-düşüm veya mesafe-düşüm verilerinin bir doğru şeklinde kendisini göstermesidir (Cooper ve Jacob, 1946). Bu yöntemde de doğrunun eğimi Δs ve yatay eksenin kesim noktası, t_0 aşağıdaki formüllere konularak iletkenlik ve depolama katsayıları

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \quad (5.55)$$

ve

$$S = \frac{2.25 t_0 T}{r^2} \quad (5.56)$$

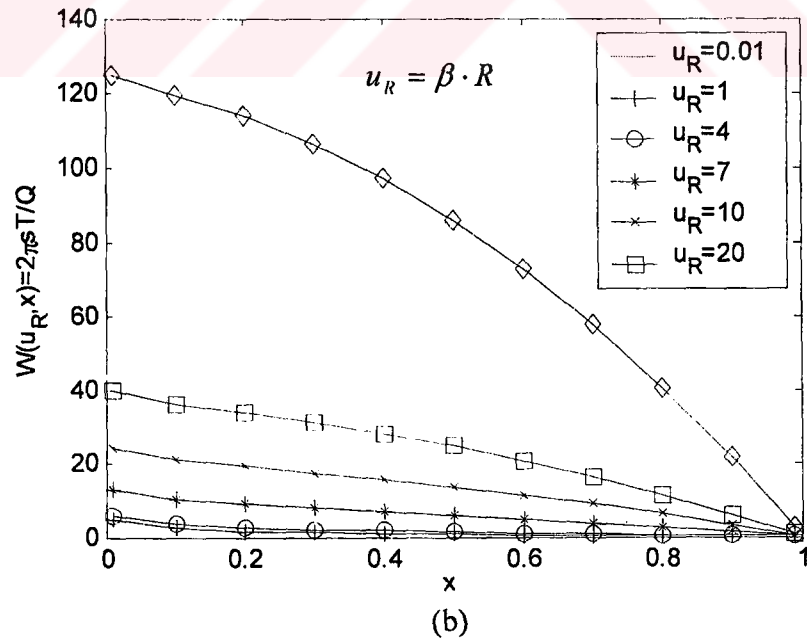
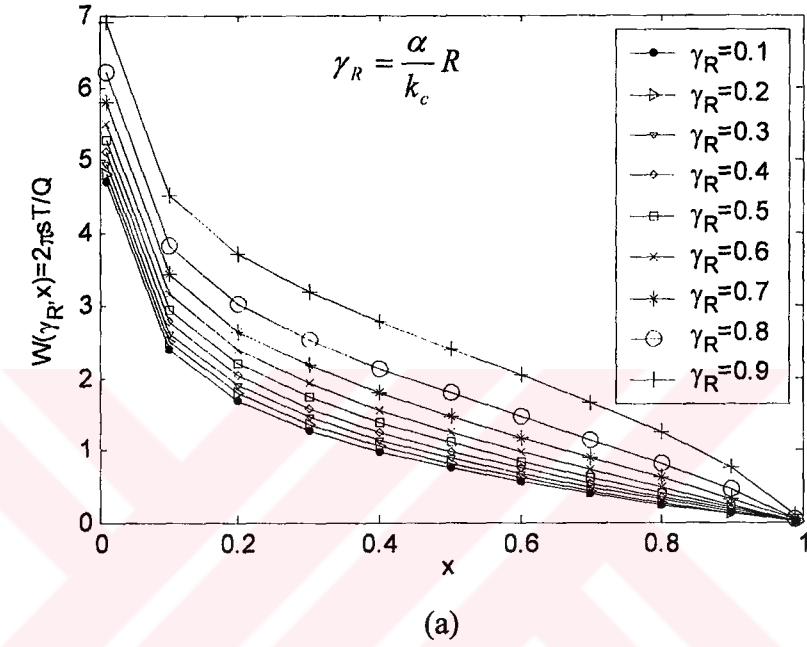
elde edilir.

5.3.4 Tip eğriler

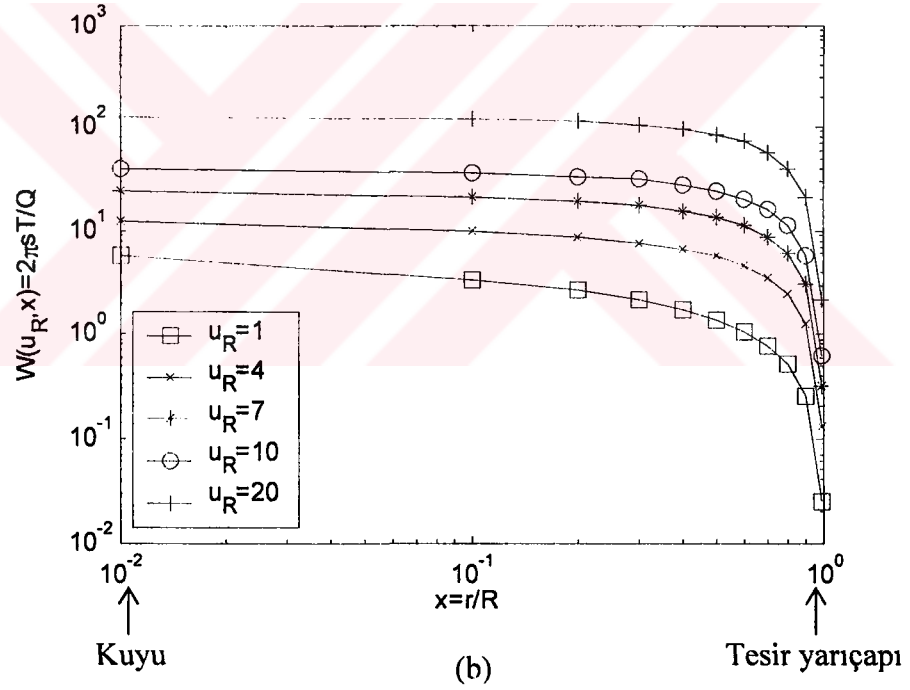
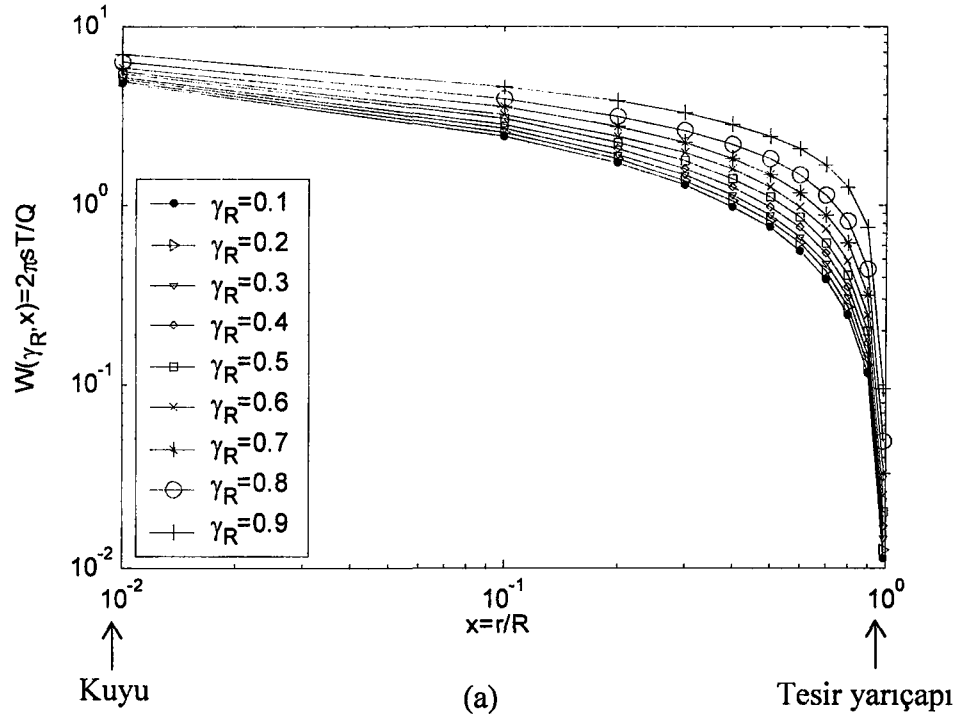
Açıklandığı gibi eğrilerin elde edilmesi basınçlı akifer ve kuyular için farklı γ_R (doğrusal yaklaşım) ve u_R (üstel yaklaşım) değerleri için Şekil 5.2.a ve Şekil 5.2.b'de gösterilmiştir.

Şekil 5.2.a ve Şekil 5.2.b'de açıkça görüldüğü üzere eğri üç farklı kısımdan oluşmaktadır. Şekil 5.2.b'de yakın mesafe (0-0.1), orta mesafe (0.1-0.8) ve uzak mesafe ise (0.8-1) aralıklarına karşı gelmektedir. Örneğin, yakın mesafeye karşı gelen kısımda eğrilik derecesi fazladır. Orta mesafeye karşı gelen kısım, ilk kısma nispeten az bir eğriliğe sahiptir. Uzak mesafeye karşı gelen kısım ise, doğrusal değişime daha yakındır. Bu her türlü gözenekli akifer sınamasında belirlenen bir durumdur. Tip eğri demeti doğrusal ve üstel yaklaşım için sırasıyla Şekil 5.3a ve 5.3b de elde edilmiştir.

Eğri fonksiyonu ile mesafe arasında ters bir ilişki vardır. Bu eğrinin üç farklı kısmı çok faydalı bilgi vermektedir. İlk kısımda eğriliğin fazla olmasının sebebi, akımın kuyuya yaklaştıkça doğrusal olmayan bir davranış göstermesindendir. Kuyuya yakın bölgede malzeme yıkandığı için geçirimsizlik diğer kısımlara göre çok yüksektir. Bunun yanı sıra akım hızına karşı gelen direnç miktarı küçüktür. Bu nedenle, kuyu civarında, eğrinin ilk kısmında görülen eğriliğin büyük olmasını bu şekilde açıklamak mümkün olur.



Şekil 5.2 – Boyutsuz mesafe ile boyutsuz kuyu fonksiyonunun değişimi a) Doğrusal yaklaşım b) Üstel yaklaşım



Şekil 5.3 – Bağımsız durum için tip eğri demeti (a) Doğrusal yaklaşım (b) Üstel yaklaşım

Görüldüğü gibi, yakın mesafede akımın hız dağılımının doğrusal olmama durumu çok, orta mesafede doğrusal olmama durumu orta ve uzak mesafede doğrusala yakın olma durumu söz konusudur. Bunun nedeni ise kuyuya yakın mesafede yeraltı suyu akım hızının büyük, orta mesafede orta ve uzak mesafede ise küçük olmasıdır.

Bilindiği gibi, literatürde Darcy Kanunu (1856) olarak bilinen yeraltı suyunun akım hızı ifadesi, hidrolik eğimle doğru orantılı olarak değişmektedir. Dolayısı ile, hidrolik eğim kuyuya yakın bölgede büyük, orta yakınlıkta orta ve uzak mesafede ise çok küçük veya sıfıra yakın değerler alır. Sonuç olarak, kuyunun yakın bölgesinde malzeme yıkanacağından, hem hidrolik iletkenlik hem de akım hızı çok büyük olduğu için doğrusal olmama büyük, orta mesafede orta ve uzak mesafede ise doğrusala yakındır.

5.4 Bağımlı Durum

Bağımlı durumda hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün birbiri ile bağımlı olarak değiştiği göz önüne alınarak, yeraltı su kuyusuna gelen debi Q , m kalınlığındaki akifer içindeki kuyudan r radyal mesafedeki silindirik yüzeyin yanal alanı ile yeraltı suyu akım hızının $V(r)$, çarpımı

$$Q = 2\pi r m V(r) \quad (5.57)$$

olarak tanımlanır. Bu tezde genelleştirilmiş olarak düşünülen yeraltı suyu akım hızı, dinamik iletkenliğin mesafeyle değişimi olarak;

$$V(r) = \frac{d(kh)}{dr} \quad (5.58)$$

bağıntısı ile tanımlanmıştır. Burada r radyal mesafeyi, h ise hidrolik yükü ifade etmekte olup bu bölümdeki hesaplamalarda “hidrolik yük” ile çalışılacaktır. Burada, hidrolik iletkenliğin hidrolik yük ile çarpımı,

$$T_D = k(r)h(r) \quad (5.59)$$

dinamik iletkenlik sayısı T_D , olarak adlandırılmıştır. Böyle bir tanım klasik Darcy Kanunu’nu doğrusal olmayan yeraltı suyu hız kanununa çevirir. Bu yeni hız formülasyonu ile akiferde hidrolik iletkenlik ve hidrolik yükün mesafe ile değişimleri göz önüne alınabilir. Yani yeraltı suyu akım hızı, hem hidrolik iletkenlik eğimi hem de hidrolik eğim değişkenlerine bağımlı olarak değişir. Bu nedenle akım, doğrusal olmayan akım hızı dağılımı sağlar. 5.58 numaralı denklem r ’ye göre türetilirse;

$$V(r) = k \frac{dh}{dr} + h \frac{dk}{dr} \quad (5.60)$$

elde edilir. Burada ilk terim, klasik Darcy Kanunu'na karşılık gelirken, ilave olarak gelen ikinci terim ise hidrolik yük sabit kalırken hidrolik iletkenliğin değişiminden dolayı akım hızına olan katkısını gösterir. Böylece bu ifade, hidrolik iletkenliğin değişmesi durumunda da ilave bir akımın oluşacağını göstermektedir. Ayrıca, aynı hidrolik eğim altında hidrolik iletkenliğin değişmesi veya aynı hidrolik iletkenlik halinde hidrolik yükün değişmesi durumları söz konusudur. Görüldüğü gibi bu ifadeyle, yeraltı suyu akım hız denklemi genelleştirilmiş olmaktadır. Halbuki Darcy (1856) Kanunu'na göre, akım hızının sadece hidrolik eğim değişimine bağlı olduğu ifade edilerek kuyu çevresinde hidrolik iletkenliğin değişmediği kabul edilmiştir. Bu ise ancak özel bir durum olarak nitelendirilebilir. Bu nedenle, $k(r) = k_c = \text{sabit}$ olması durumunda, 5.60 numaralı denklem göz önünde bulundurulursa, Darcy (1856)'nin yeraltı akım hız denklemi;

$$V(r) = k \frac{dh}{dr} \quad (5.61)$$

elde edilir. Dolayısı ile, bu tezde değişimlerin etkileri incelenerek yeni ve genelleştirilmiş yeraltı suyu yaklaşımları ele alınacaktır. Bu amaca ulaşabilmek için, tezde hidrolik iletkenliğin radyal mesafe ile değişimi, sırası ile önce doğrusal daha sonra da üstel olarak aşağıdaki ifadelerle göz önünde bulundurulacaktır.

$$k(r) = k_c - ar \quad (5.62)$$

$$k(r) = k_c e^{-br} \quad (5.63)$$

Bağıntılarda, k_c kuyu cidarındaki hidrolik iletkenliği, $a \geq 0$ ve $b \geq 0$ ise hidrolik iletkenliğin azalma oranını gösteren yeni sabitlerdir. Daha önce yeraltı suyu literatüründe mevcut olan bütün yaklaşımlarda, $a = 0$ ve $b = 0$ halleri yani hidrolik iletkenliğin kuyudan itibaren değişmediği göz önünde bulundurularak incelemeler yapılmıştır. Oysa ki bu tezde, değişimlerin etkileri incelenmektedir.

5.4.1 Doğrusal iletkenlik değişimi

Böyle bir değişimi gösteren 5.62 numaralı ifade r' ye göre türetilirse,

$$\frac{dk}{dr} = -a \quad (5.64)$$

olur. Türetilen ifade 5.60 numaralı denklemde yerine yazılır ve 5.57 numaralı denklemle birlikte kullanılırsa,

$$\frac{Q}{2\pi m r (k_c - ar)} = \frac{dh}{dr} - \frac{a}{(k_c - ar)} h \quad (5.65)$$

elde edilir. Homojen olmayan bu 1. mertebe doğrusal diferansiyel denklemin önce homojen (ikinci tarafsız) kısmının çözümü belirlenecek daha sonra homojenliği bozan, eşitliğin sol tarafındaki terimin etkisi göz önünde bulundurulacaktır. Buradan,

$$\frac{dh}{dr} - \frac{a}{(k_c - ar)} h = 0 \quad (5.66)$$

elde edilir. Bu denklemin entegrasyonu sonucunda ise 1. mertebe doğrusal ve homojen diferansiyel denklemin çözümü,

$$\ln h + \ln(k_c - ar) = \ln c$$

$$h = \frac{c}{(k_c - ar)} \quad (5.67)$$

olarak elde edilir. Bundan sonra bu ifadenin homojen olmayan diferansiyel denklemin çözümü olabilmesi için, c sabitinin nasıl bir $c(r)$ fonksiyonu olması gerektiği araştırılacaktır. Buna göre, homojen denklemin yukarıdaki çözümü kullanılırsa homojen olmayan diferansiyel denklem,

$$\frac{Q}{2\pi m r} = \left[(k_c - ar) \frac{\frac{dc}{dr}(k_c - ar) + ac}{(k_c - ar)^2} - \frac{ac}{(k_c - ar)} \right]$$

$$\frac{Q}{2\pi m r} \frac{dr}{r} = dc \quad (5.68)$$

şeklini alır. Bu denklem entegre edilirse,

$$c(r) = \frac{Q}{2\pi m} \ln r - K_1 \quad (5.69)$$

şeklini alır. Burada K_1 integral sabitidir. Homojen olmayan diferansiyel denklemin çözümü olarak,

$$h = \frac{Q}{2\pi m (k_c - ar)} \ln r - \frac{K_1}{(k_c - ar)} \quad (5.70)$$

elde edilir. Burada K_1 integral sabitinin belirlenmesi amacıyla $r = R$ için $h = H$ sınır koşulu kullanılırsa,

$$H = \frac{Q}{2\pi m(k_c - aR)} \ln R - \frac{K_1}{(k_c - aR)} \quad (5.71)$$

bulunur. Buna göre, homojen olmayan diferansiyel denklemin genel çözümü,

$$h = \frac{Q}{2\pi m(k_c - ar)} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + \frac{H(k_c - aR)}{(k_c - ar)}$$

veya daha açık bir şekilde,

$$h = \frac{Q}{2\pi m k_c \left(1 - \frac{a}{k_c} r\right)} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + \frac{H k_c \left(1 - \frac{a}{k_c} R\right)}{k_c \left(1 - \frac{a}{k_c} r\right)} \quad (5.72)$$

olur. Bundan sonra 5.72 numaralı denklemde bulunan sabit ve değişkenlerden,

$$f = \frac{a}{k_c} \quad (5.73)$$

ters mesafe faktörü f ,

$$\eta_r = f r \quad (5.74)$$

boyutsuz doğrusal radyal mesafesi η_r ve

$$\eta_R = f R \quad (5.75)$$

boyutsuz doğrusal tesir mesafesi η_R olarak tanımları yapıp, bu ifadeler 5.72 numaralı denklemde yerlerine yazılırsa,

$$h = \frac{Q}{2\pi T(1 - \eta_r)} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + \frac{H(1 - \eta_R)}{(1 - \eta_r)} \quad (5.76)$$

elde edilir. Bölüm 5.3.1'de x olarak tanımlanan $\frac{r}{R}$ boyutsuz mesafe oranı, 5.76 numaralı denklemde yerine yazılırsa,

$$h = \frac{Q}{2\pi T(1 - \eta_r)} \ln(x) + \frac{H(1 - \eta_R)}{(1 - \eta_r)} \quad (5.77)$$

şeklini alır. Bundan sonra η_r ve η_R boyutsuz sayılar birbirlerine oranlanırsa,

$$\eta_r = x \eta_R \quad (5.78)$$

olur. Bu ifade 5.77 numaralı denklemde yerine yazılırsa,

$$h = \frac{Q}{2\pi T(1-x\eta_R)} \ln(x) + \frac{H(1-\eta_R)}{(1-x\eta_R)} \quad (5.79)$$

genel çözümü elde edilir.

Özel olarak $f = 0$ yani $k = k_c = \text{sabit}$ ise $\eta_R = 0$ olur. Dolayısı ile yukarıdaki çözüm,

$$h = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + H$$

veya

$$H - h = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

şeklini alır. Burada düşün

$s = H - h$ tanımı yapılarak,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

veya T nin çekilmesi ile,

$$\boxed{T = \frac{Q}{2\pi s} \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (5.80)$$

elde edilir. Bu bağıntı, Thiem (1906) tarafından önerilmiş olan, permanan yeraltı suyu akımı için akiferin iletim kapasitesini verir.

Bundan sonra, 5.79 numaralı denklemde elde edilen genel çözümün boyutsuzlaştırılması için denklemin her iki tarafı, $\frac{2\pi T}{Q}$ ile çarpılırsa,

$$\frac{2\pi h T}{Q} = \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{(1-x\eta_R)} + \frac{2\pi T H}{Q} \frac{(1-\eta_R)}{(1-x\eta_R)} \quad (5.81)$$

elde edilir. Bundan sonra,

$$W(h) = \frac{2\pi h T}{Q} \quad (5.82)$$

boyutsuz hidrolik yük fonksiyonu $W(h)$ ve

$$W(H) = \frac{2\pi T H}{Q} \quad (5.83)$$

boyutsuz statik yük fonksiyonu $W(H)$ olarak tanımlanırsa yukarıdaki denklem boyutsuzlaştırılmış olur. En son ifadede $H \approx h$ olması durumunda $T=T_b$ olur. Burada T_b , başlangıçtaki iletim kapasitesi olarak tanımlanabilir. Diğer taraftan, 5.81 numaralı denklemden

$$W(h) = \frac{\ln(x)}{(1-x\eta_R)} + W(H) \frac{(1-\eta_R)}{(1-x\eta_R)} \quad (5.84)$$

doğrusal yaklaşım için boyutsuz genel kuyu denklemi elde edilmiş olur.

Matematik sınır şartlarının fiziksel gerçeklere uygunluğu kontrol edilmelidir. Bilindiği gibi $r \rightarrow R$ 'ye yaklaştıkça $h \rightarrow H$ 'ye yaklaşacaktır. Bu nedenle 5.84

numaralı denklemde de $x = 1$ olacağından $W(h) = W(H)$ çıkacaktır. Buradan, $\frac{h}{H} = 1$

yani $h = H$ durumuna ulaşılır. Böylece, fiziksel gerçek matematik çıkarımla uyum göstermiştir. O halde, değişik $W(H)$ ve η_R değerleri için yatay eksen x ve düşey eksen $W(h)$ değerlerini gösteren tip eğriler elde edilebilir. Tip eğrilerin, akiferin T , f , a ve R parametrelerinin pratik olarak belirlenmesinde çok büyük kolaylıklar sağlayabileceği bir sonraki bölümde gösterilecektir.

5.4.2 Üstel iletkenlik değişimi

Üstel değişimi gösteren 5.63 numaralı ifade r 'ye göre türetilirse,

$$\frac{dk}{dr} = -b k_c e^{-br} \quad (5.85)$$

olur. Türetilen ifade 5.60 numaralı denklemde yerine yazılır ve 5.57 numaralı denklemle birlikte kullanılırsa,

$$\frac{Q e^{br}}{2\pi m r k_c} = \frac{dh}{dr} - b h \quad (5.86)$$

elde edilir. Bu denklem, sabitlerin değişim kuralı ile çözülecektir. Homojen olmayan bu 1. mertebe doğrusal diferansiyel denklemde, önce homojen (ikinci tarafsız)

kısımın çözümü belirlenecek daha sonra homojenliği bozan, eşitliğin sol tarafındaki terimin etkisi göz önünde bulundurulacaktır. Buna göre ilk önce

$$\frac{dh}{dr} - b h = 0 \quad (5.87)$$

denklemini ele alınacaktır. Bu denklemin entegrasyonu sonucunda elde edilen 1. mertebe doğrusal ve homojen diferansiyel denklemin çözümü,

$$\ln h - b r = \ln c \Rightarrow h = c e^{br} \quad (5.88)$$

olarak elde edilir. Bundan sonra, bu ifadenin, homojen olmayan diferansiyel denklemin çözümü olabilmesi için, c sabitinin nasıl bir $c(r)$ fonksiyonu olması gerektiği araştırılacaktır. Buna göre homojen denklemin yukarıdaki çözümü kullanılırsa homojen olmayan diferansiyel denklem,

$$\frac{Q e^{br}}{2\pi r m k_c} = \left(\frac{dc}{dr} e^{br} + b c e^{br} \right) - b c e^{br} \quad (5.89)$$

$$\frac{Q}{2\pi r m k_c} = \frac{dc}{dr} \quad (5.90)$$

şeklini alır. Bu denklem entegre edilirse,

$$\begin{aligned} \frac{Q}{2\pi r m k_c} \int \frac{dr}{r} &= \int dc \\ c(r) &= \frac{Q}{2\pi r m k_c} \ln r - K_2 \end{aligned} \quad (5.91)$$

elde edilir. Burada K_2 entegral sabitidir. Bundan sonra

$$T = m k_c \quad (5.92)$$

iletim kapasitesi tanımı kullanılırsa Denklem 5.91,

$$c(r) = \frac{Q}{2\pi T} \ln r - K_2 \quad (5.93)$$

şeklini alır ve homojen olmayan diferansiyel denklemin çözümü ise,

$$h = \left(\frac{Q}{2\pi T} \ln r - K_2 \right) e^{br} \quad (5.94)$$

şeklinde elde edilir. K_2 entegral sabitinin belirlenmesi amacıyla $r = R$ ve $h = H$ sınır koşulu kullanılarak,

$$H = \left[\frac{Q}{2\pi T} \ln R - K_2 \right] e^{bR}$$

ifadesi elde edilir. Bundan sonra entegral sabiti olan K_2 çekilirse,

$$K_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln R - H e^{-bR} \quad (5.95)$$

bulunur. Buna göre homojen olmayan diferansiyel denklemin genel çözümü için,

$$h = \left[\frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + H e^{-bR} \right] e^{br} \quad (5.96)$$

elde edilir. Bundan sonra, 5.96 numaralı denklemde bulunan sabit ve değişkenlerden,

$$\theta_r = br \quad (5.97)$$

boyutsuz üstel radyal mesafe θ_r ve

$$\theta_R = bR \quad (5.98)$$

boyutsuz üstel tesir mesafesi θ_R , olarak tanımlanır ve bu boyutsuz sayılar 5.96 numaralı denklemde yerine yazılırsa,

$$h = \frac{Q e^{\theta_r}}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{R}\right) + H e^{(\theta_r - \theta_R)} \quad (5.99)$$

elde edilir. Bölüm 5.3.1'de x olarak tanımlanan $\frac{r}{R}$ boyutsuz mesafe oranı Denklem 5.99'da yerine yazılırsa,

$$h = \frac{Q e^{\theta_r}}{2\pi T} \ln x + H e^{(\theta_r - \theta_R)} \quad (5.100)$$

olur. Ayrıca θ_r ve θ_R boyutsuz sayıları birbirlerine oranlanırsa,

$$\theta_r = x \theta_R \quad (5.101)$$

olur. Bu ifade 5.100 numaralı denklemde yerine yazılarak,

$$h = e^{x \theta_R} \left[\frac{Q}{2\pi T} \ln x + H e^{-\theta_R} \right] \quad (5.102)$$

elde edilir.

Özel olarak $b = 0$ yani $k = k_c = \text{sabit}$ olması halinde, $\theta_R = 0$ olacaktır. Dolayısı ile yukarıdaki çözüm,

$$h = \frac{Q}{2\pi T} \left(\frac{r}{R} \right) + H ,$$

$$H - h = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

şeklini alır. Burada düşün

$s = H - h$ tanımı yapılarak

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

ve buradan T çekilirse,

$$T = \frac{Q}{2\pi s} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \quad (5.103)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı, Thiem (1906) tarafından önerilmiş olan, permanan yeraltı suyu akımı için akiferin iletim kapasitesini veren bağıntıdır.

Yukarıdaki Denklem 5.102'de elde edilen genel çözümün boyutsuzlaştırılmasına

geçilir ve her iki tarafı $\frac{2\pi T}{Q}$ ile çarpılırsa,

$$\frac{2\pi T h}{Q} = e^{x \theta_R} \left[\ln x + \frac{2\pi T H}{Q} e^{-\theta_R} \right] \quad (5.104)$$

elde edilir. Bundan sonra,

$$W(h) = \frac{2\pi T h}{Q} \quad (5.105)$$

boyutsuz hidrolik yük fonksiyonu $W(h)$ ve

$$W(H) = \frac{2\pi T H}{Q} \quad (5.106)$$

boyutsuz statik yük fonksiyonu ile denklem boyutsuzlaştırılmış olur. Son denklemde $H \approx h$ olması durumunda, başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b olmak üzere $T=T_b$ elde edilir. Boyutsuzlaştırılmış denklem, pratikte akifer parametrelerinin belirlenmesinde çok büyük kolaylık sağlar. Yukarıdaki boyutsuz tanımlar, 5.104 numaralı denkleme yerleştirilirse,

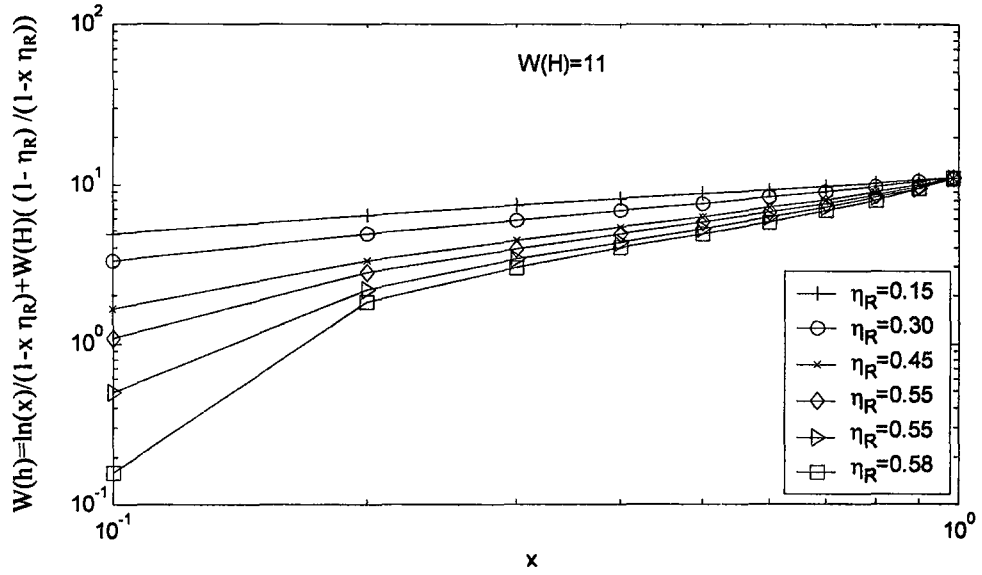
$$W(h) = e^{x\theta_R} [\ln x + W(H)e^{-\theta_R}] \quad (5.107)$$

elde edilir. Böylece üstel yaklaşım için boyutsuz genel kuyu denklemi elde edilmiş olur.

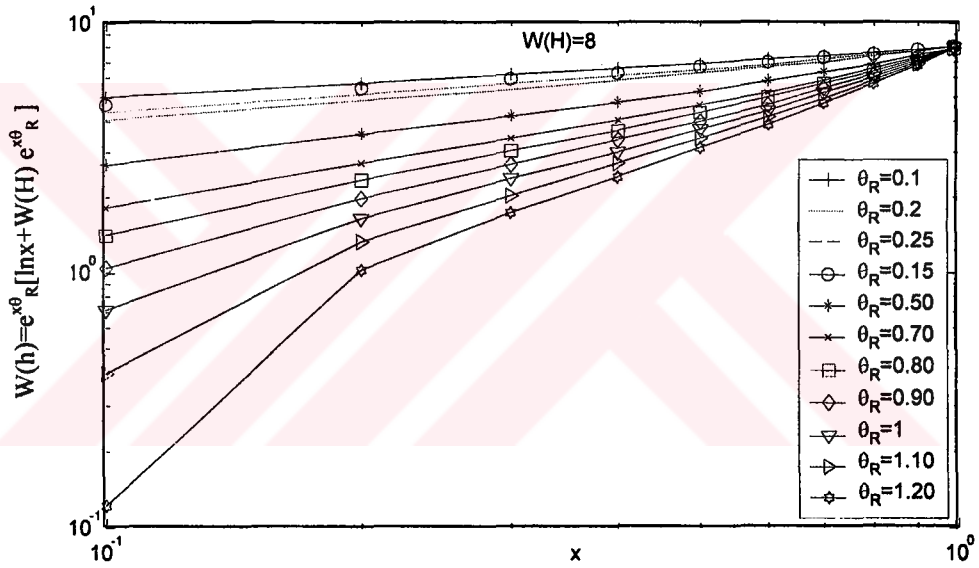
Matematik sınır şartlarının fiziksel gerçeklere uygunluğu kontrol edilmelidir. Bilindiği gibi $r \rightarrow R'$ 'ye yaklaştıkça, $h \rightarrow H'$ 'ye yaklaşacaktır. Bu nedenle 5.107 numaralı denklemde $x = 1$ olacağından $W(h) = W(H)$ çıkacaktır. Burada, $\frac{h}{H} = 1$ yani $h = H$ durumuna ulaşılır ve fiziksel gerçek matematik çıkarımla uyum göstermiş olur. O halde, değişik $W(H)$ ve θ_R değerleri için yatay eksen x ve düşey eksen $W(h)$ değerlerini gösteren tip eğriler çizilebilir. Bu tip eğrilerin akiferin T , b ve R parametrelerinin pratik olarak belirlenmesinde çok büyük kolaylıklar sağlayacağı bir sonraki bölümde gösterilecektir.

5.4.3 Tip eğriler

Burada tip eğri, boyutsuz hidrolik yük fonksiyonu $W(h)$ ile boyutsuz mesafe oranı x' in değişimi olarak tanımlanmıştır. $W(h)$, mesafe arttıkça artmaktadır. Pratikte de, kuyudan itibaren mesafe arttıkça hidrolik yük miktarı artmaktadır. Dolayısıyla, model ile ölçüm değerleri bu bakımdan uyum göstermektedir. Tip eğrilerin elde edilmesi, η_R (doğrusal yaklaşım) ve θ_R (üstel yaklaşım) parametreleri için x aralığında belirli bir boyutsuz statik yük fonksiyonu $W(H)$ değerinde, farklı η_R ve θ_R değerlerine karşılık gelen tip eğri demeti Şekil 5.4.a ve Şekil 5.4.b'deki gibi elde edilir.



(a)



(b)

Şekil 5.4 – Bağımlı durum için tip eğri demeti (a) Doğrusal yaklaşım, (b) Üstel yaklaşım.

Şekil 5.4.a ve Şekil 5.4.b’de eğrinin üç farklı kısımdan oluştuğu açık olarak görülmektedir. Bu üç bölgede de doğrusal olmayan bir değişim söz konusudur. Şekil 5.4.a’da yakın mesafe kısmı (0.1-0.2), orta mesafe (0.2-0.6) ve uzak mesafe ise (0.6-1) aralıklarına karşı gelmektedir. Örneğin, yakın mesafeye karşı gelen kısımda hidrolik eğim miktarındaki değişim büyük, orta mesafede orta ve uzak mesafede küçüktür. Benzer olarak, hidrolik eğim miktarındaki en küçük değişimler kuyudan

çok uzak mesafelerde ortaya çıkmaktadır ve tesir mesafesinde de sıfıra yakın bir değer almaktadır.

Tüm bu sonuçlardan, hidrolik iletkenlik ve hidrolik eğimin birbirine bağımlı olarak değiştiği için kuyuya yakın bölgelerde hidrolik eğimdeki değişme miktarının çok büyük bir değer aldığı şeklinde yorumlanabilir. Kuyuya yakın bölgelerde hem hidrolik iletkenlik eğimi hem de hidrolik eğim artış göstereceğinden ve bu iki parametre birbirine bağımlı veya bağımsız olarak değişebileceğinden dolayı, yeraltı suyu akım hızının değeri doğrusal olmayan bir şekilde artış gösterir. Ancak klasik Darcy Kanunu'nun, hidrolik iletkenlik sabit kabul edildiğinden dolayı doğrusal olmayan bir ilişkiyi göstermesi beklenemez.

Kuvvet fonksiyonu eğriselliği büyük, üstel fonksiyon ise eğriselliği az olan bir fonksiyondur. Kuvvet fonksiyonu logaritması alındığında doğrusal bir fonksiyon olarak görülür. Burada, tip eğride görüldüğü gibi ilk kısımda doğrusal fonksiyon olması ile kuyuya yakın bölgelerde akımın doğrusal olmayan hız dağılımı büyüktür sonucuna varılabilmektedir. Çünkü, hem düşümdeki hem de hidrolik iletkenlikteki artış, yeraltı suyu akım hızında doğrusal olmayan bir artışı doğurur. Dolayısı ile, kuyuya yakın olan bölgelerde akımın hızı çok büyüktür.

Tip eğride ikinci bölgeye bakıldığında, doğrusal olmama durumu birinci bölgeye nispeten daha azdır. Üçüncü bölgede ise, akımın hız dağılımındaki doğrusal olmama durumu en küçük olur. Daha genel bir ifadeyle kuyudan uzaklaştıkça akımın doğrusal olmama durumu azalır. Bunun yanında, her bir bölgeyi temsil eden doğruların eğimi, akım hızındaki değişmeyi vermektedir. Tip eğrideki birinci kısımda eğim çok büyük, ikinci kısımda orta, üçüncü kısımda ise küçüktür. Bu sonuca dayanarak, kuyuya yakın bölgelerde akım hızı büyük, orta mesafelerde orta ve uzak mesafelerde ise küçüktür diye ifade edilebilir. Ayrıca önemli bir nokta da, her bir bölgeyi bir doğrunun temsil etmesi ve bu doğrulara ait bir de eğimin söz konusu olmasıdır. Bu doğruların eğimleri kullanılarak, her bölgeye ait farklı çözümler yapılabilir ve bu sayede akifer parametreleri tespit edilebilir.

Akiferde farklı bölgeleri temsil eden tip eğrideki üç farklı eğri, aslında literatürde yamalı akifer (Şen, 1987) olarak bilinen yöntemin özel halidir. Bu çalışmada ise elde edilen çözüm, yamalı akiferin genel halidir. Dolayısıyla, bu çalışmayla genel çözüm elde edilmiştir. Bu üç farklı bölgeyi temsil eden doğruların değişimi fiziksel olarak

dinamik iletkenliği ifade eder. Yani bu doğruların eğimi, dinamik iletkenlik değişimini, o da yeraltı suyu akım hızını verir. Pratikte de gözlenen sonuçlar bu şekilde cereyan eder. Çünkü kuyuya yakın bölgede, hem hidrolik iletkenlik eğimi hem de hidrolik eğim artacağından dolayı dinamik iletkenlik de artmaktadır. Kuyudan uzak mesafede ise, dinamik iletkenlik değeri küçük olur. Yukarıda yapılan tüm yorumlardan bu konunun ileride geliştirilmeye aday araştırma konuları arasında olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bahsi geçen yorumlarda küçük, orta, büyük, yakın ve uzak gibi bulanık kelimeler kullanılmıştır.



6. UYGULAMALAR

6.1 Giriş

Hesaplanması istenen akifer parametreleri arasında; porozite, hidrolik iletkenlik, iletim kapasitesi, depolama katsayısı, özgül verim ve sızma faktörleri vardır. Sızma faktörü; birim hidrolik yük altında birim alandan sızan yük miktarıdır. Her ne kadar boyutsuz gözüktüğüne dahi görünmeyen bir boyuta sahiptir. Özgül verim; akiferden elde edilebilecek su miktarının toplam hacme oranına denir. Arazide elde edilen zaman-düşüm veya mesafe-düşüm verilerinden, uygun bir matematik model de göz önünde tutularak parametrelerin değerleri tespit edilebilir. Bu modeller, akifer parametrelerine ilave olarak, kuyu ile ilgili bazı büyüklük ve pompa karakteristiklerinin de bulunmasına yarar. Böylece bir yeraltı suyu haznesinin planlanmasında debiler, düşümler ve mesafeler ile işletme kuralları bir bütün olarak belirlenebilir. Şen (1995) tarafından belirtildiği üzere, tam anlamı ile uygun bir akifer sınaması yapıldığında aşağıdaki bilgiler elde edilebilir:

- a) Depolama ve iletim kapasitesi ile özgül verim ve sızma faktörü gibi akifer parametrelerinin tahmini,
- b) Geçirimli ve geçirimsiz tabakalar, mesafe, yön ve doğal durumlarının tespiti,
- c) Kuyu etrafındaki yanal değişimler, ve
- d) Kuyu kayıpları, güvenilir debi, özgül düşüm ve özgül kapasite gibi kuyu ile ilgili büyüklüklerin tespiti.

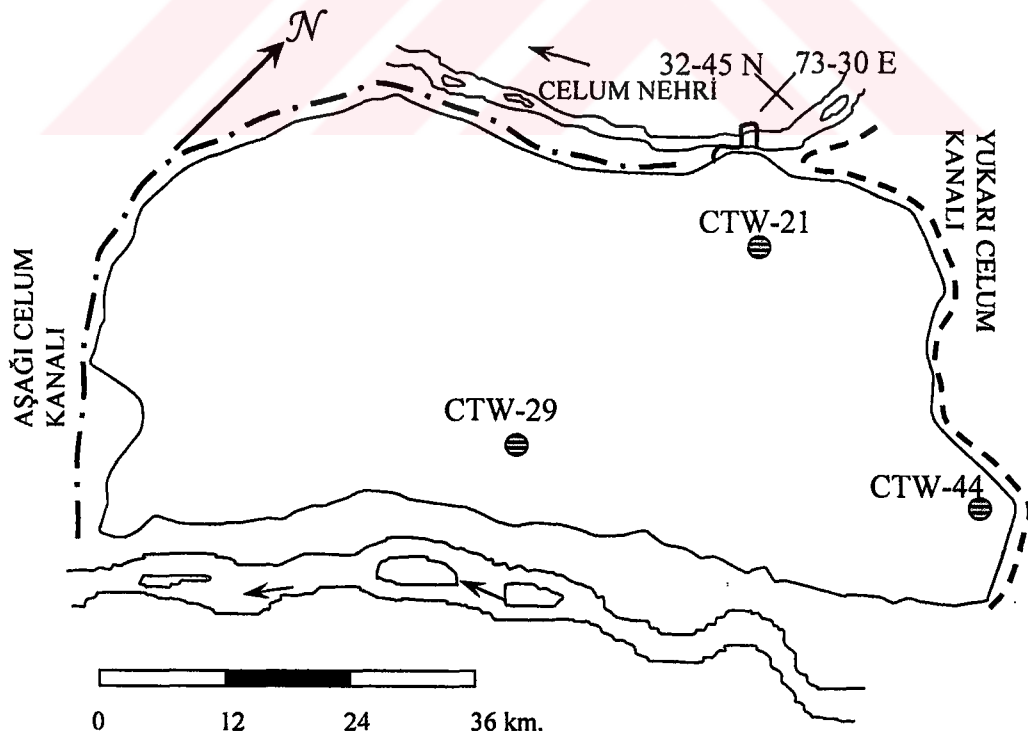
Çok sayıda değişken jeolojik yapının bulunması durumunda bile, akifer parametrelerinin belirlenmesi için uygun matematik modellerin seçilmesi, gerekli kabullerin yapılması, en geçerli başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi gerekir.

Pratik çalışmalarda, akifer parametrelerinin elde edilmesi için Theis (1935) Tip Eğrisi göz önünde tutulur. Buna teorik eğri adı da verilebilir. Bundan yararlanılarak akifer parametrelerinin hesaplanabilmesi için akifer sınanmalıdır. Bunun anlamı; akiferden sabit kuyu debisi ile su çekilerek gözlem kuyusundaki veya en azından ana

kuyudan yeraltı suyu seviyelerindeki düşümlerin zaman veya mesafe ile ölçülmesi gerektiğidir. Böylece zaman veya mesafe düşüm verileri elde edilir. Düşüm verilerinin elde edilmesi için akiferden su çekmeden önce (pompa çalışması öncesi) statik piyezometre (su seviyesi) ölçümü yapılmalıdır. Daha sonra pompa çalıştırılarak pompaj ve gözlem kuyularında oluşan düşüm ölçülür. Ölçülen bu verilerin tip eğri ile aynı ölçekli kağıt üzerine noktalanması sonucunda, mesafe (zaman) ile gittikçe azalan (artan) düşümlerin eğilimi ortaya çıkar. Bu düşümler, tam anlamıyla belirgin bir eğri üzerinde bulunamazlar ama genel eğilimi olan bir eğri etrafında dağılırlar. Uygulama olarak, akifer parametrelerinin hesabı için Pakistan'dan elde edilen CTW-29 (Ahmad, 1998) verileri kullanılmıştır.

6.2 Uygulama Alanı ve Veri Davranışı

Pakistan'ın Chaj Doab bölgesinde akifer parametrelerinin belirlenmesi için, bütün bölgeyi temsil edecek şekilde farklı yerlerde ölçüm yapılmıştır. Burada kullanılan akifer sınaması verileri Ahmad (1998) tarafından verilmiştir. Sınamanın yapılacağı üç farklı yer seçilerek bu yerler Şekil 6.1'de CTW-21, CTW-44 ve CTW-29 olarak gösterilmiştir. CTW-29 bölgesinde pompaj ve beslemenin (geri dönüş) her iki aşamasında düşümler kayıt edilmiştir (Ahmad 1998). Tablo 6.1 permanan akım halindeki düşümleri gösterir.



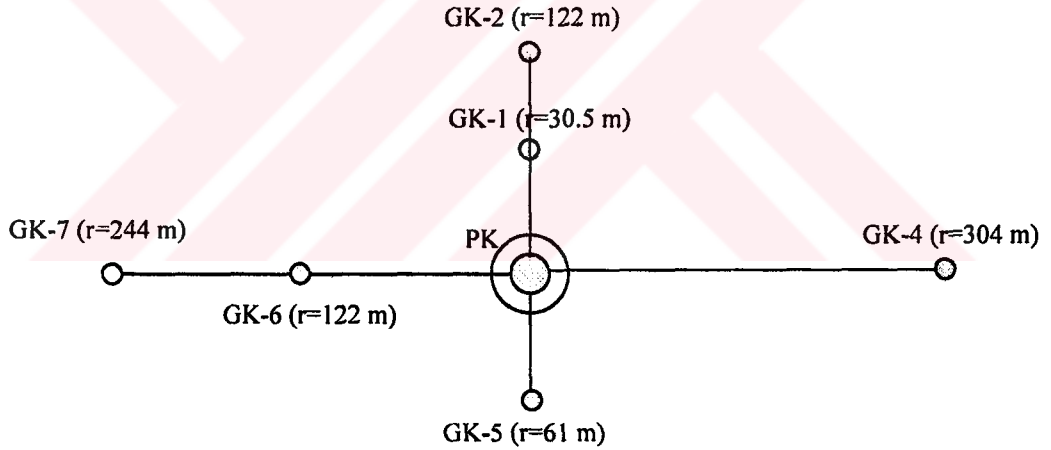
Şekil 6.1 – Çalışma alanı

Bu pompaj tecrübeleri Pakistan'da bulunan Su ve Toprak Araştırma Merkezi ile Su ve Güç Geliştirme Merkezleri tarafından kayıt edilmiştir. Bu veriler Pakistan Lahor'da WAPDA, Hidroloji Genel Müdürlüğü'nün çıkarmış olduğu raporlardan (No.9, Volume II, Lahor, 1983) alınmıştır.

Tablo 6.1 Basıncılı akifer için permanan akım verisi (Ahmad, 1998)

Kuyu No	MW	G ₁	G ₅	G ₂	G ₄	G ₆	G ₇
Mesafe r(m)	0.2	30.5	61	122	304	122	244
Düşüm s(r) (m)	13.64	2.86	1.77	1.14	0.78	0.39	0.41
Hidrolik yük h(r) (m)	6.36	17.14	18.23	18.66	19.22	19.61	19.59

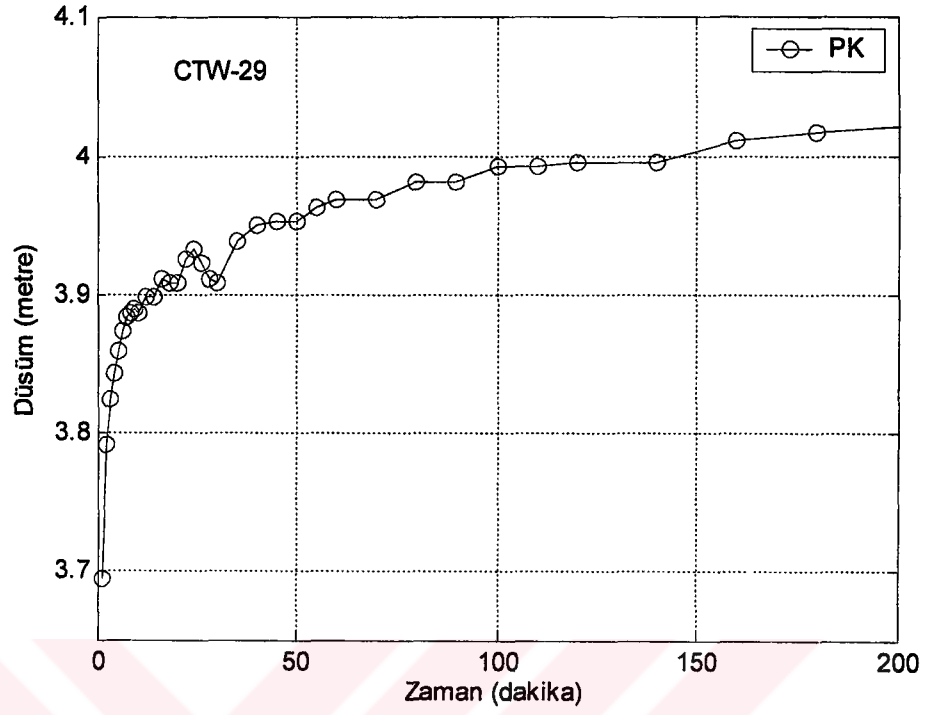
Pompaj tecrübesi Chaj Doab alanında uygulanmıştır. Pompaj, 26 Mayıs 1956'da yerel saate göre sabah saat 08:00'de başlamış ve 29 Mayıs 1959'da sabah saat 04:00'te bitirilmiştir. Düşüm konisinin periyodik konumunu belirlemek için, pompaj kuyusunun çevresinde farklı yön ve mesafelerde altı adet gözlem kuyusu açılmıştır. Gözlem kuyularına ait plan Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Pompaj süresince, pompaj debisi 4 m³/s'lik sabit bir değerde tutulmuştur.



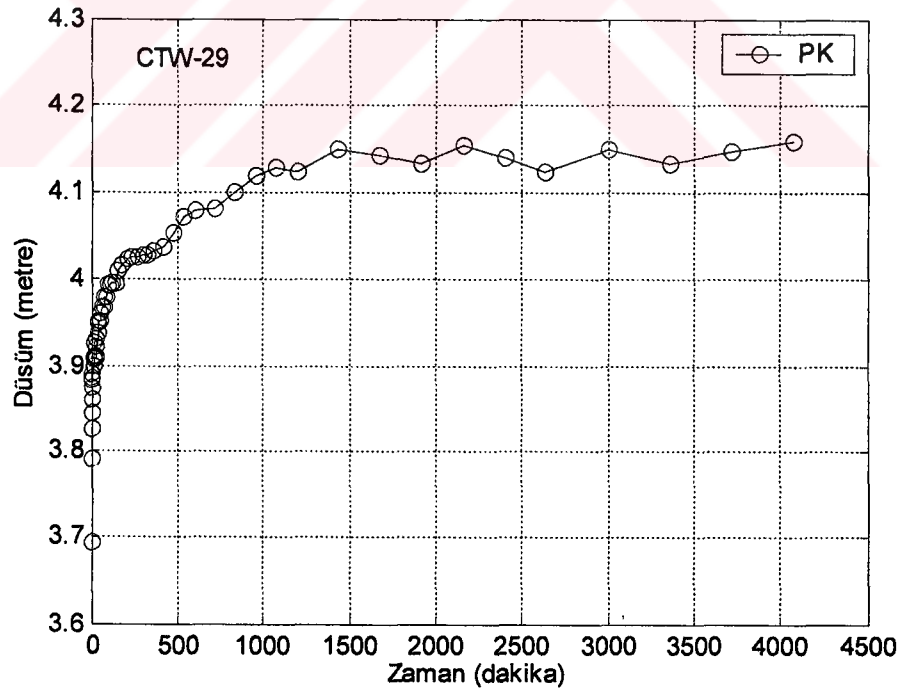
Şekil 6.2 – CTW-29' da pompaj ve gözlem kuyularının planı

Jeolojik tabakaların büyük bir bölümü alüvyon kil ve kumdan oluşmaktadır. Gözenekli ortam maddenin esas tabakasını kum oluşturmaktadır. Bunun yanında, alüvyon kil tabakaları farklı seviyelerde mevcut olup kalınlıkları 1.22 ile 1.5m'den daha fazla değildir. Alüvyon kilin oluşma şekli, farklı gözlem kuyularında farklı yapı göstermektedir. Alüvyon kil, geçirimsiz tabaka, kum tabakası ise akifer olarak görev yapmaktadır. GK-1 numaralı gözlem kuyusunda altı adet alüvyon kil tabakası

mevcuttur. Dolayısı ile, pompaj süresince basınçlı veya sızdırmalı akifer olarak davranır.



(a)



(b)

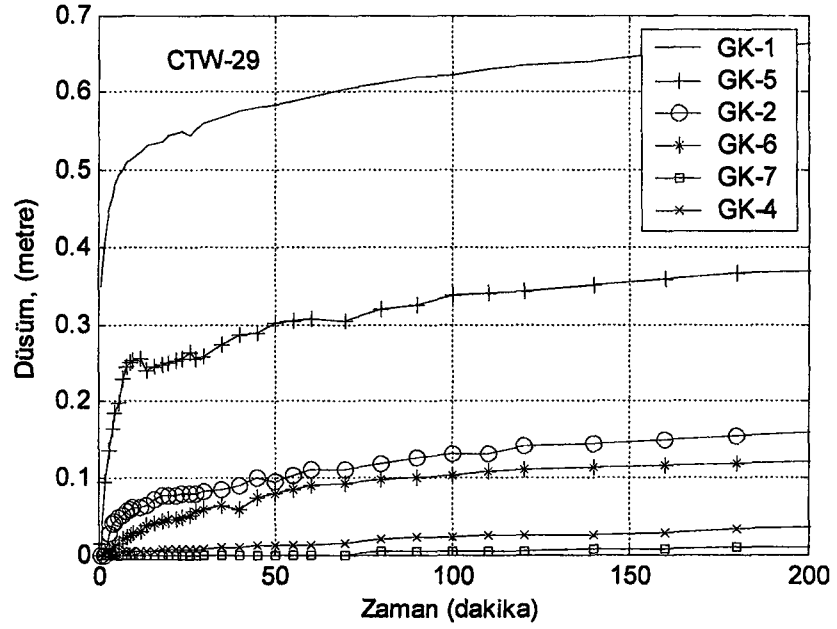
Şekil 6.3 – Ana kuyu düşüm-zaman eğrisi (a) 200 dakika (b) pompaj süresi boyunca

Diğer gözlem kuyularının da aynı davranış şeklini göstereceği söylenebilir. Pompaj kuyusunun çapı 35.56 cm ve pompaj debisi 4 m³/s'dir. Şekil 6.3.a ve Şekil 6.3.b pompaj kuyusunun 200. dk. ve 4500. dk.'lık sürelerde zaman-düşüm verilerini sunmaktadır. Şekil 6.3.a, pompaj kuyusundan çekilen suya karşı akiferin çok hızlı olarak cevap verdiğini göstermektedir.

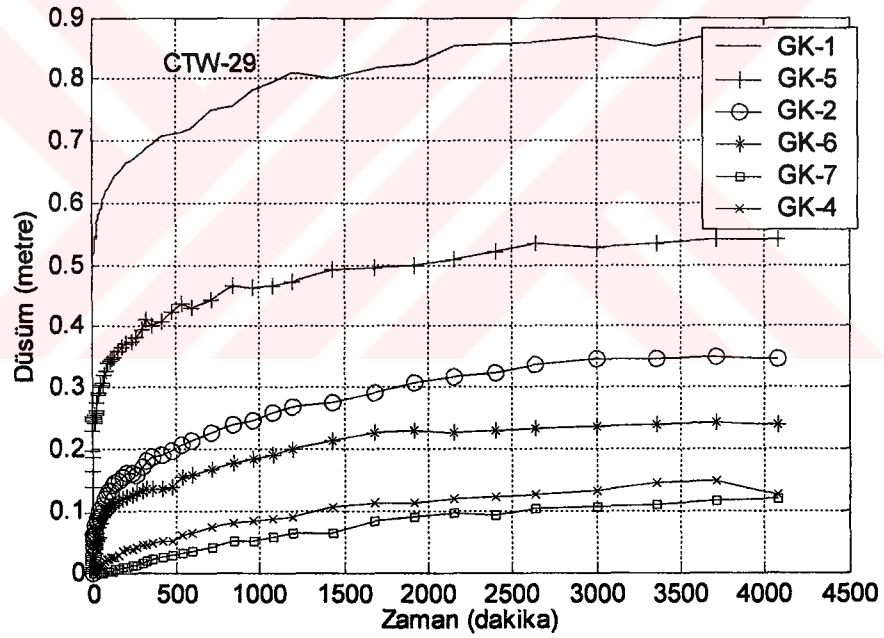
İlk dakikalarda pompaj kuyusundan çekilen hacim 6.80 m³'tür. Eğer aynı zamanda akiferden hızlı bir tepki olmasaydı, pompaj kuyusundaki düşüm, yaklaşık 68.58 m olmalıydı. Fakat, Şekil 6.3.a'da bir dakikadan sonra pompaj kuyusunda ölçülen düşümün yalnızca 3.69 m olduğu açık olarak görülmektedir. Bunun anlamı, kuyu çapının ihmal edilebileceğidir. Çünkü akifer, çekilen suya hemen cevap verdiği için kuyunun deposu ihmal edilebilir. Yani pompajın başlamasıyla akifer aynı zamanda cevap vermektedir. Diğer taraftan 10 ila 30 dakikalık süreler arasında eğride düzensiz davranışlar gözlenmiştir. Bu da, akifer içinde saklı heterojenlikler olan düzensizliklere ışık tutar.

Düşüm konisi genişledikten sonra gecikmeli besleme de az miktar genişler. Başka bir ifadeyle, Şekil 6.3.b'de zaman-düşüm verilerinin tamamını içermekte olup, test süresince akifer davranışının tamamını sergilemektedir. Bu şekil, 200. ila 600. ve 600. ila 1400. dakikalar süresince, gecikmeli beslemenin başlangıcında düşümün düzensiz olarak arttığını ve 1500. dakikanın sonuna doğru genel sabit bir eğilimle ortalama etrafında salınım yaparak devam ettiğini göstermektedir.

Şekil 6.4.a ve Şekil 6.4.b, 200. ila 4500. dakikalık süreler için gözlem kuyularının zaman-düşüm ölçümlerini göstermektedir. Burada GK-2 ve GK-6 numaralı gözlem kuyuları pompaj kuyusundan 122'şer m. uzaklıkta olmalarına rağmen aynı sürede farklı sonuçlar göstermektedirler. GK-6 numaralı gözlem kuyusunda GK-2 numaralı gözlem kuyusundan daha küçük düşüm değerleri gözlenmiştir. Bu durum, akiferin içerdiği jeolojik formasyonun heterojen ve anizotropik bir yapıya sahip olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Gözlem kuyularının her ikisi de pompaj kuyusu ile 90 derecelik bir açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. GK-6 numaralı gözlem kuyusu daha yüksek geçirgenliğe sahiptir ve bunun en büyük delili, permanan rejimin daha çabuk elde edilmesidir.



(a)



(b)

Şekil 6.4 – Gözlem kuyuları düşüm-zaman eğrileri (a) 200 dakika, (b) pompaj süresi boyunca.

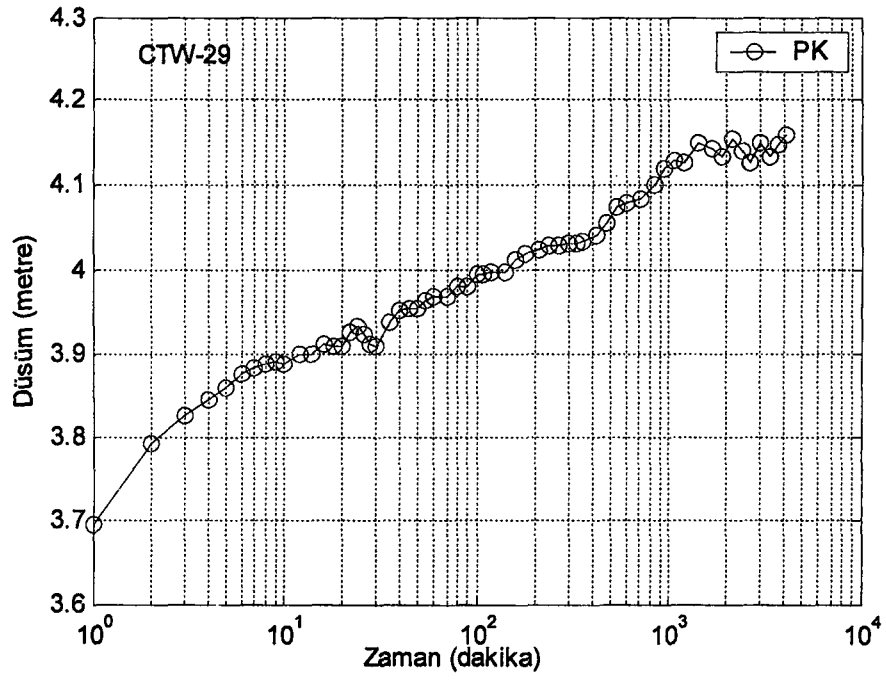
Pompaj kuyusu ile 180 derecelik açıyla yerleştirilmiş olan GK-4 ve GK-7 numaralı gözlem kuyuları anormal davranış sergilemektedir. Şekil 6.2’de gösterildiği gibi GK-4 numaralı gözlem kuyusu pompaj kuyusundan 305 m’lik bir mesafede, GK-7

numaralı gözlem kuyusu ise pompaj kuyusundan 244 m'lik bir mesafede açılmıştır. GK-7 ve GK-4 numaralı gözlem kuyularının pompaj kuyusuna olan yakınlıklarına bakıldığında, normalde GK-7 numaralı gözlem kuyusunda daha büyük düşüm olması beklenir. Fakat, GK-4 numaralı gözlem kuyusunda daha büyük düşüm gözlenmiştir. Bunun nedeni, GK-7 numaralı gözlem kuyusunun etrafını çevreleyen gözenekli ortam geçirgenliğinin GK-4 numaralı gözlem kuyusundakine göre daha büyük olmasıdır. GK-7 numaralı gözlem kuyusu, çevresinde oldukça geçirimli bir tabaka bulunan GK-6 numaralı gözlem kuyusuna doğru yerleştirilmiştir.

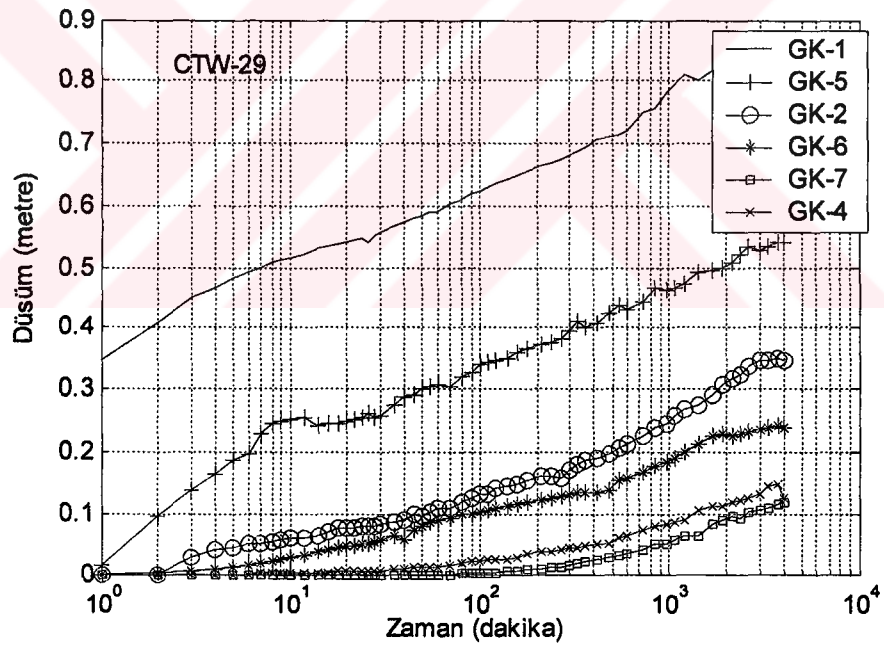
Şekil 6.5.a ve Şekil 6.5.b sırasıyla pompaj kuyusu ve gözlem kuyularının yarı logaritmik ölçekli zaman-düşüm değerlerini göstermektedir. Klasik analitik tekniklerin tarifiyle, yarı logaritmik eksen üzerinde zaman-düşüm eğrisinin geç zaman verisi doğrusal bir eğri olarak görülür. Doğrudan olan sapmalar, Şen ve Al Baradi (1991) tarafından değinilen saklı hidrojeofiziksel heterojenliklerin göstergesidir.

Yarı logaritmik ölçekli eğri, pompaj kuyusunun civarında çok heterojen ortamın olduğunu gösterir. İlk kısmındaki aşağı doğru eğrilik, kuyu çevresindeki ortamdan suyun kuyu içerisine girmesine karşı ortaya konan direnci, doğru etrafındaki düzensiz sapmalar da gözenekli ortam tabakasının sistematik olmayan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Küçük kısımda, 200. ve 400. dakikalar arasında düşüm sistematik olarak azalmaktadır. Bunun sebebi düşüm konisinde bulunan suyun, yerçekimi etkisiyle belli bir süre sonra akifere katkı sağlamasıdır. Bu duruma “gecikmeli besleme” adı verilir. Düşüm konisi ise, akiferden çekilen suyun kuyu çevresinde oluşturduğu hacimdir. Sonuç olarak, düşümdeki sistematik olmayan davranışlar yaklaşık olarak ortalama bir durum göstermektedir.



(a)



(b)

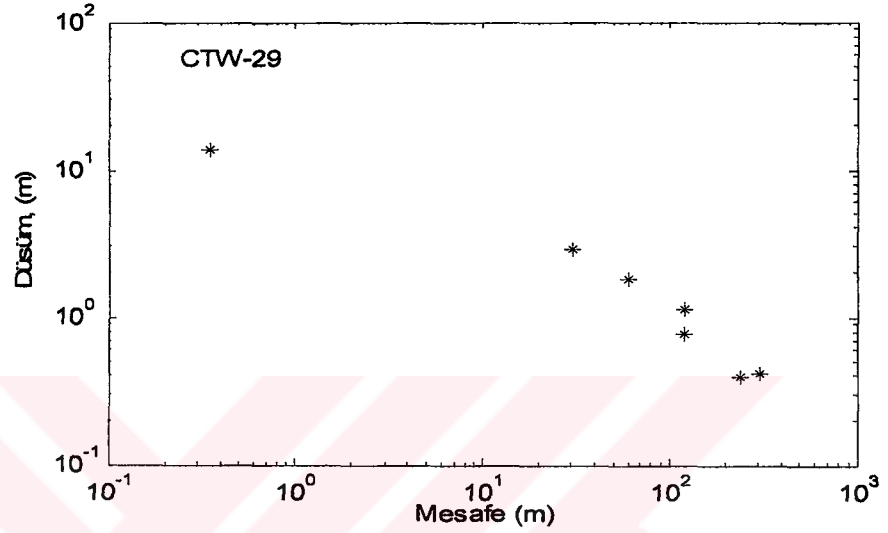
Şekil 6.5 – Yarı-logaritmik kağıtta düşüm-zaman verileri, (a) ana kuyu (b) gözlem kuyuları

6.3 Bağımsız Durum

6.3.1 Doğrusal iletkenlik değişimi uygulamaları

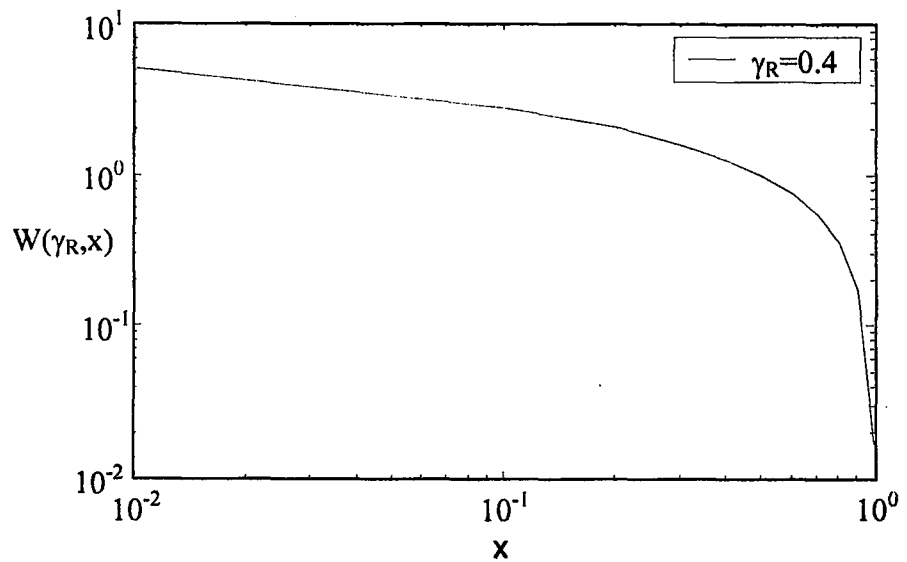
Aynı şekilde akifer parametrelerinin hesaplanabilmesi amacıyla yukarıda yapılmış olan adımlar doğrusal yaklaşım için uygulanırsa,

- a) Mesafe-düşüm verileri çift-logaritmik kağıt üzerine, yatay eksenle mesafe, düşey eksenle düşümler olacak biçimde Şekil 6.6'da olduğu gibi işaretlenir,



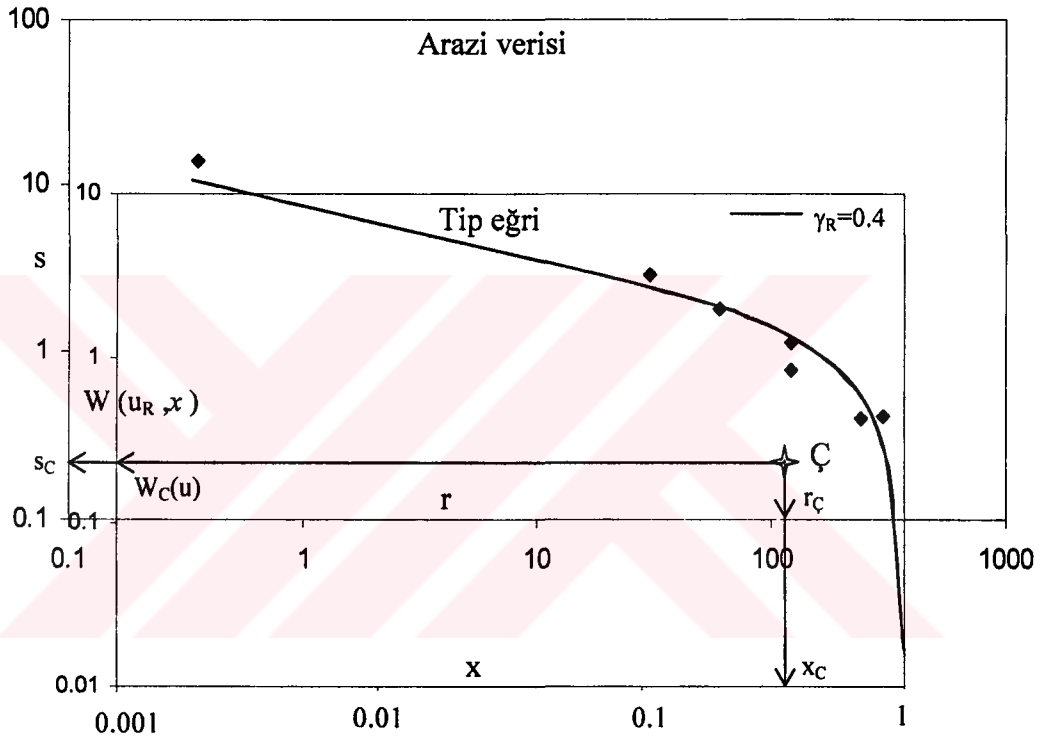
Şekil 6.6 – CTW-29 için mesafe-düşüm verileri

- b) Daha sonra mesafe ile düşüm azalmasının teorik karşıtı olan x ile, $W(\gamma_R x)$ değişimini veren tip eğri, çift-logaritmik kağıt üzerine Şekil 6.7'teki gibi hazırlanır,



Şekil 6.7 – Doğrusal yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri

- c) Model ve arazi kağıtları sayısal ortamda hazırlandıktan sonra, modele göre mesafe düşüm verilerinin konumları görülebilir hale getirilir. Model ve arazi kağıtları, arazi kağıdındaki mesafe-düşüm eksenine, model kağıdında $x-W(\gamma_R, x)$ eksenine paralel kalacak biçimde birbirine göre hareket ettirilerek, mesafe-düşüm noktalarının tip eğri etrafına saçılan en iyi konumu Şekil 6.8’te gösterildiği gibi belirlenir,
- d) Her iki kağıdın ortak olan herhangi bir noktasına Şekil 6.8’de gösterildiği gibi Ç (Çakıştırma noktası) adı verilir,



Şekil 6.8 – Doğrusal yaklaşım için tip eğri çakıştırması

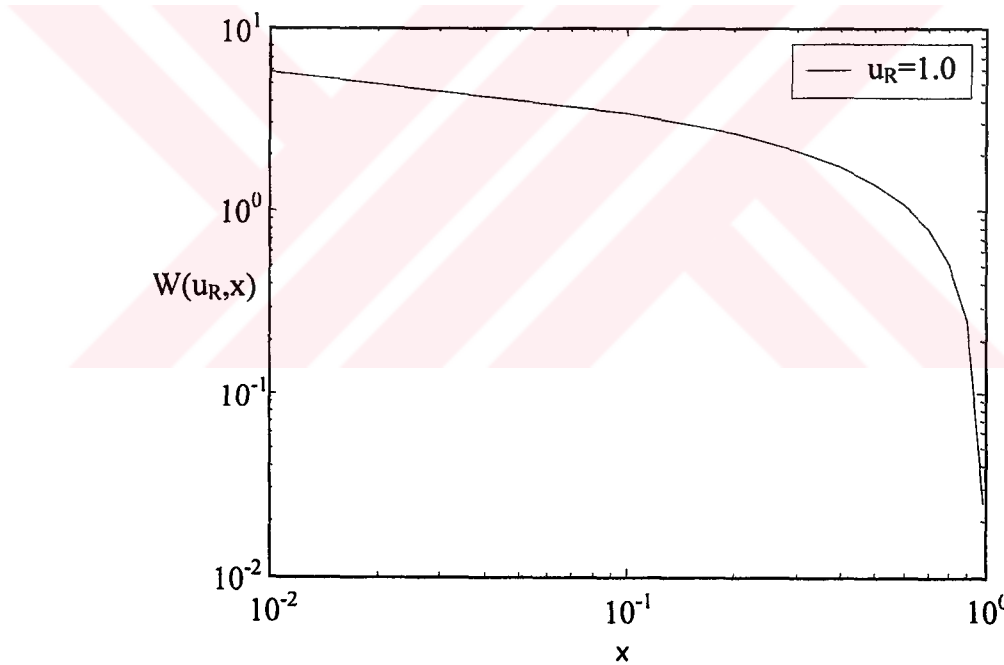
- e) Model ve arazi kağıtlarında çakıştırma (matching point) noktasının koordinatları olan $x_C = 0.3$, $W_C(\gamma_R, x) = 0.3$, $r_C = 120 \text{ m}$, $s_C = 0.26 \text{ m}$ ve $(\gamma_R)_C = 0.4$ değerleri okunur,
- f) Bundan sonra tesir yarı çapını belirlemek için 5.27 numaralı denklem kullanılırsa $R = 400 \text{ m}$ olur.
- g) İletim kapasitesini belirlemek için 5.34 numaralı denklem kullanılırsa, $T = 63000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olur.

- h) Ters mesafe faktörünü hesaplamak için 5.25 numaralı denklem kullanılırsa, $f = 0.001 \text{ 1/m}$ olur.
- i) Hidrolik iletkenliğin azalma oranı olan α değerini belirlemek için 5.23 numaralı denklem kullanılırsa, $\alpha = 10^{-6} \text{ 1/s}$ olur. k_c tüm hesaplamalarda 10^{-3} m/s olarak ele alınmıştır.

Sonuç olarak doğrusal yaklaşım durumu için akifer parametreleri $R = 400 \text{ m}$, $T = 63000 \text{ m}^2/\text{gün}$, $f = 0.001 \text{ 1/m}$ ve $\alpha = 10^{-6} \text{ 1/s}$ olarak hesaplanmıştır.

6.3.2 Üstel iletkenlik değişimi uygulamaları

- a) Önce mesafe-düşüm verileri, çift-logaritmik kağıt üzerine yatay eksenle mesafe, düşey eksenle düşümler olacak biçimde Şekil 6.6'da gibi işaretlenir,
- b) Daha sonra mesafe ile düşüm azalmasının teorik karşılığı olan x ile $W(u_R, x)$ değişimini veren tip eğri çift-logaritmik kağıt üzerine Şekil 6.9'da olduğu gibi hazırlanır,



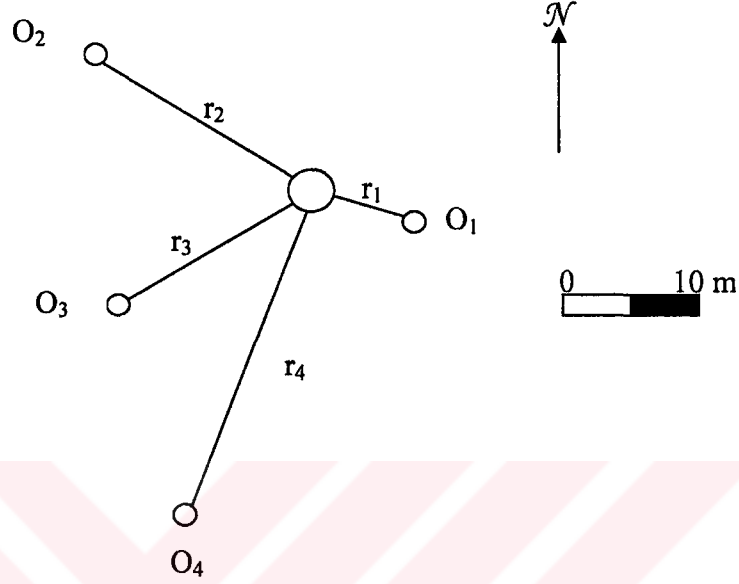
Şekil 6.9 – Üstel yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri

- c) Model ve arazi kağıtları sayısal ortamda hazırlandıktan sonra modele göre mesafe-düşüm verilerinin konumları görülebilir hale getirilir. Model ve arazi kağıtları, arazi kağıdındaki mesafe-düşüm eksenine, model kağıdında x - $W(x, u_R)$ eksenleri paralel kalacak biçimde birbirine göre hareket ettirilerek, mesafe-düşüm noktalarının, tip eğri etrafına saçılan en iyi konumu Şekil 6.10'da gösterildiği gibi belirlenir,

6.3.3 Pratik karşılaştırma

Bu çalışmada elde edilen denklemler, literatürde (Şen,1995) yayınlanmış olan farklı verilere tatbik edildiği takdirde aşağıdaki grafikler ve sonuçlar elde edilmektedir.

Uygulama alanına ait veriler; pompaj debisi $Q = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$, tam nüfuz eden 3 m çapında kuyudur. Kuyuların yerleşim planı Şekil 6.11'te verilmiştir.

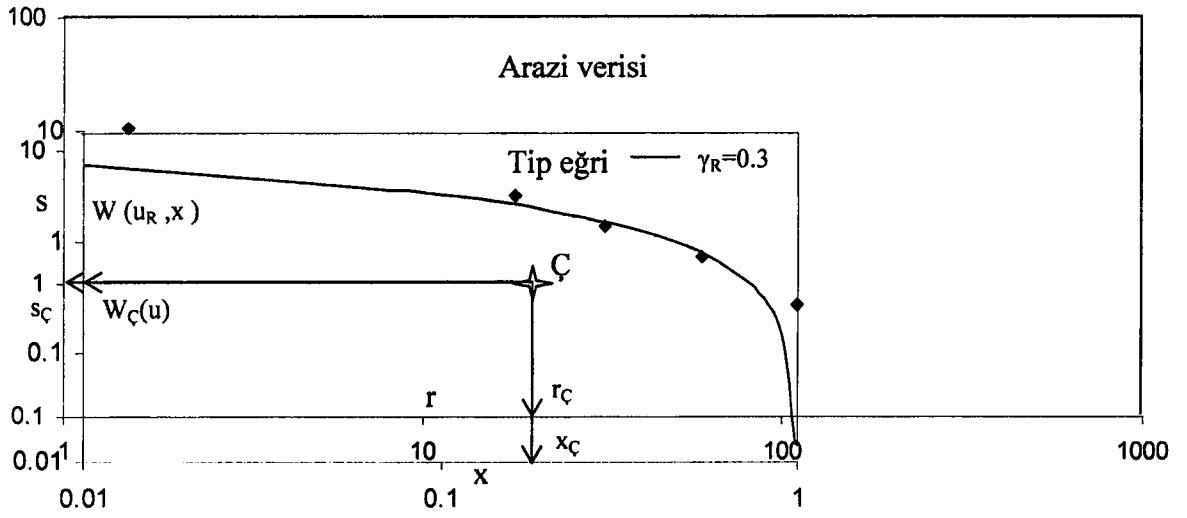


Şekil 6.11 – Pompaj ve gözlem kuyuları planı

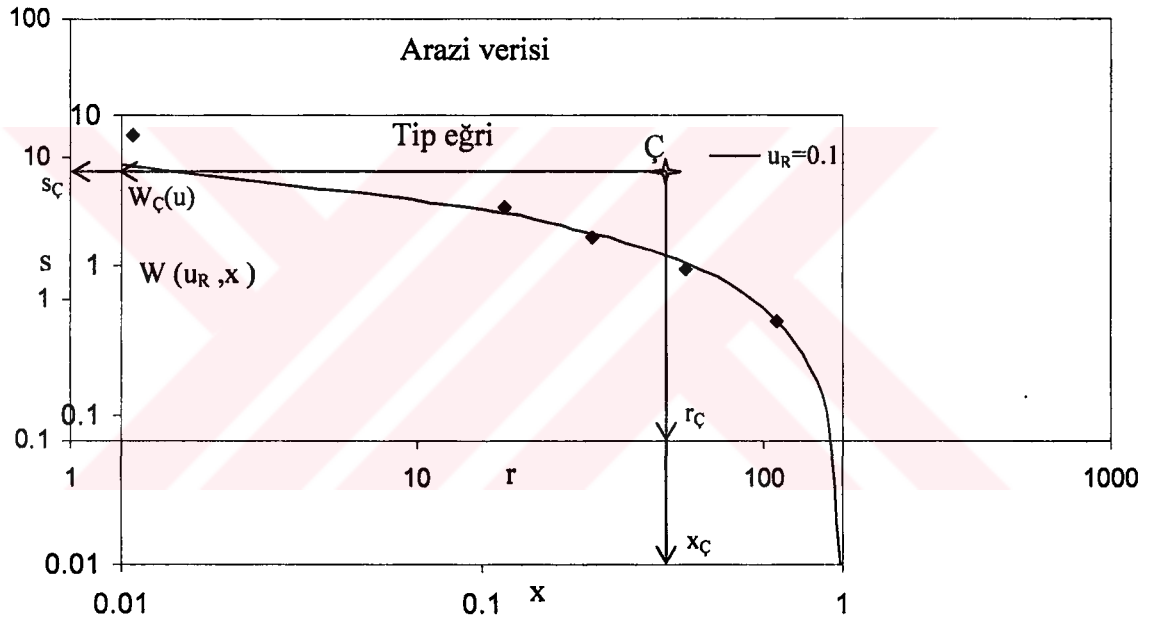
Tablo 6.2’de sunulduğu gibi, pompaj tecrübesi dört adet gözlem kuyusunda tatbik edilmiş olup akiferin kalınlığı yaklaşık 20 m’dir. İlk bakışta bu tabloda görüldüğü gibi, düşüm ana kuyuda gözlem kuyularına nispeten daha büyüktür. Çakıştırma yöntemi, önceki uygulamada anlatıldığı gibi Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te çakıştırma işlemi yapılarak yöntem tatbik edildiğinde, doğrusal yaklaşım için $R = 110 \text{ m}$, $f = 0.0027 \text{ l/m}$, $\alpha = 0.0000027 \text{ l/s}$ ve $T = 1900 \text{ m}^2/\text{gün}$ değerleri elde edilmiştir. Üstel yaklaşım içinse akifer parametreleri $R = 120 \text{ m}$, $\beta = 0.0008 \text{ l/m}$ ve $T = 1500 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 6.2 Basınçlı akifer için permanan akım verisi (Şen, 1995)

Kuyu No	MW	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
Mesafe r(m)	1.5	18	32	60	110
Düşüm s(r) (m)	14.4	4.5	2.7	1.6	0.7
Hidrolik yük h(r) (m)	5.6	15.5	16.3	18.4	19.3



Şekil 6.12 – Doğrusal yaklaşım için tip eğri çakıştırması



Şekil 6.13 – Üstel yaklaşım için tip eğri çakıştırması

Uygulamadan elde edilen neticelere bakıldığında, doğrusal ve üstel yaklaşımlarda akiferin verimini belirten en önemli parametre olan T , farklı değerler almaktadır. Bu çalışmada iki farklı veri grubu kullanılmıştır.

Birinci grup verilerde, doğrusal yaklaşımda $T = 63000 \text{ m}^2/\text{gün}$, üstel yaklaşımda $T = 96000 \text{ m}^2/\text{gün}$, ve Thiem(1906)'e göre ise $T = 74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir. ikinci grup verilerde, doğrusal yaklaşımda $T = 1900 \text{ m}^2/\text{gün}$, üstel yaklaşımda $T = 1400 \text{ m}^2/\text{gün}$, ve Thiem(1906)'e göre ise $T = 1700 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak hesaplanmıştır.

Bulunan iletim kapasitelerinin yüksek çıkması, akiferin çok verimli olduğu anlamına gelmektedir. Her iki veri grubunda da Thiem(1906)'e göre hesaplanan T değeri, doğrusal ve üstel yaklaşımlardan elde edilen T değerleri arasında çıkmaktadır. Buradan, Thiem(1906)'e göre hesaplanan değerin ortalama bir değere karşı geldiği düşünölebilmektedir. Birinci grup verilerden elde edilen neticelere bakıldığında, doğrusal yaklaşımda elde edilen değer, üstel yaklaşımda elde edilen değerden daha küçük çıkmaktadır.

İkinci grup verilere bakıldığında ise tam tersi bir durum söz konusudur. Böyle farklı değerlerin ortaya çıkması makul ve kabul edilebilirdir. Bu sonuçlar yapılan analitik çalışmaların doğruluğunu dolaylı yönden göstermektedir. Yeraltı suyu akım hızı ifadesi düşünöldüğünde, üstel yaklaşımın gözenekli ortamlar için uygun olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü yeraltı suyu akım hızı hidrolik iletkenliğe bağılı olarak değişmektedir. Kuyuya yakın bölgede yeraltı suyu akım hızı daha büyük olacağından, kuyudan uzaklaştıkça yeraltı suyu akım hızı azalacağından ve kuyular kullanıldıkça cidarlarında hidrolik iletkenlik artış göstereceğinden, buradaki durum modeli her zaman için üstel yaklaşıma uygun çıkarmaktadır. Sonuç olarak, gözenekli ortamda üstel yaklaşımın iyi sonuç vereceğı söylenebilir.

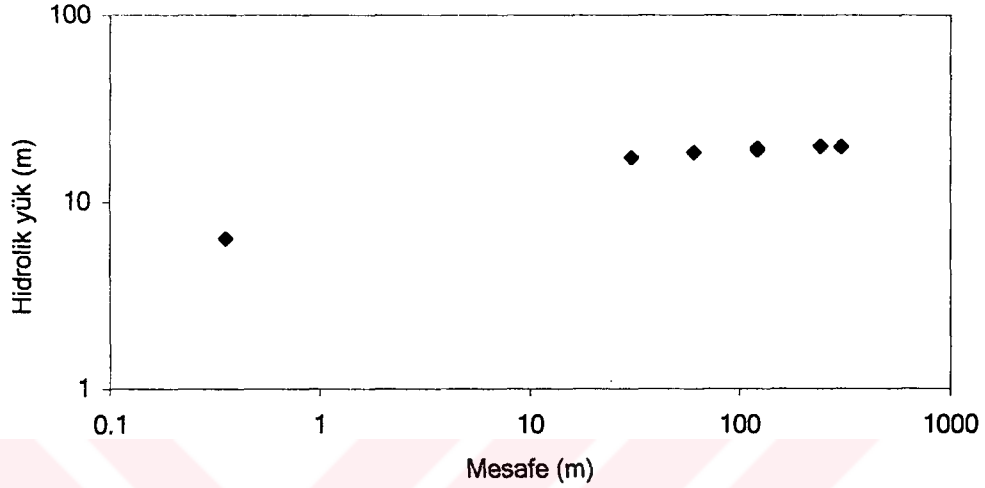
6.4 Bağımlı Durum

Pratik çalışmalarda, akifer parametrelerinin elde edilmesi için Theis (1935) tip eğrisi göz önünde bulundurulmaktadır. Bundan yararlanılarak, akifer parametrelerinin hesaplanabilmesi için akifer sınanmalıdır. Bunun anlamı, akiferden sabit pompa debisi ile su çekilerek gözlem kuyusundaki veya en azından ana kuyudan, yeraltı suyu seviyelerindeki düşümlerin mesafe ile ölçölmesidir. Böylece mesafe - düşüm verileri elde edilir. Düşüm verilerinin elde edilmesi için akiferden su çekmeden önce, statik su seviyesi (piyezometre) ölçölümü yapılmalıdır. Daha sonra pompa çalıştırılarak pompaj ve gözlem kuyularında ortaya çıkan düşümler ölçölür. Bu verilerin, tip eğri ile aynı ölçekli kağıt üzerine noktalanması sonucunda mesafe ile gittikçe artan hidrolik yüklerin trendi ortaya çıkar. Bu hidrolik yükler, tam anlamıyla belirgin bir eğri üzerinde bulunmazlar. Genel trendi olan bir eğri etrafında dağılırlar. Akifer parametrelerinin hesabında, bağımsız durum için kullanılan CTW-29 verileri kullanılarak aşğıdaki işlemler sırasıyla yapılmalıdır. Burada kullanılan veriler, Ahmad (1998) tarafından yapılan bir doktora tezinden alınmıştır.

6.4.1 Doğrusal iletkenlik değişimi uygulamaları

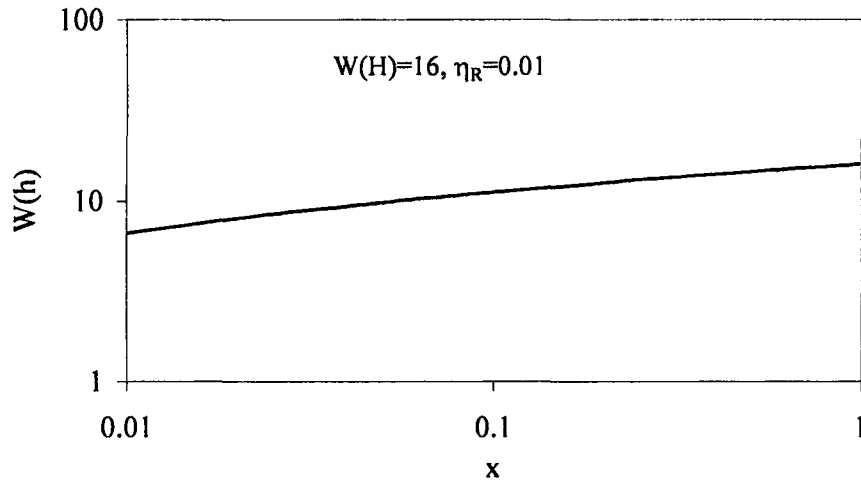
Aynı şekilde, akifer parametrelerinin hesaplanabilmesi amacıyla yukarıda yapılmış olan adımlar doğrusal yaklaşım için tekrarlanırsa,

- a) Mesafe-hidrolik yük verileri çift-logaritmik kağıt üzerine yatay eksende mesafe, dikey eksende hidrolik yükler olacak biçimde Şekil 6.14'te işaretlenir,



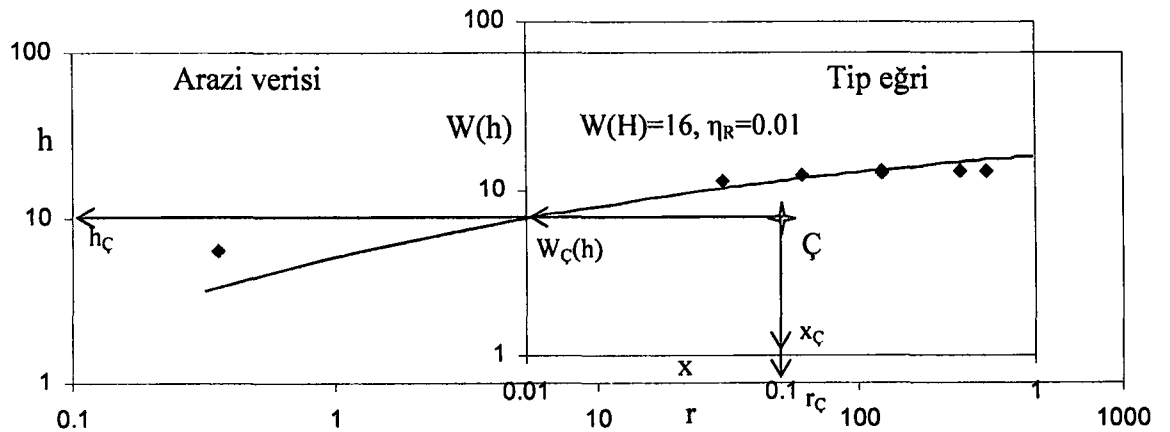
Şekil 6.14 – CTW-29 için mesafe-hidrolik yük verileri (Tablo 6.1'den alınmıştır)

- b) Daha sonra mesafe ile düşüm azalmasının teorik karşılığı olan x ile $W(h)$ değişimini veren tip eğri, çift-logaritmik kağıt üzerine Şekil 6.15'te gibi hazırlanır,



Şekil 6.15 – Doğrusal yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri

- c) Model ve arazi kağıtları sayısal ortamda hazırlandıktan sonra, modele göre mesafe-hidrolik yük verilerinin konumları görülebilir hale getirilir. Model ve arazi kağıtları, arazi kağıdındaki mesafe-hidrolik yük eksenine, model kağıdında $x-W(h)$ eksenine paralel kalacak biçimde birbirine göre hareket ettirilerek, mesafe-hidrolik yük noktalarının tip eğri etrafında saçılan en iyi konumu Şekil 6.16’da gösterildiği gibi belirlenir,
- d) Her iki kağıdın ortak alanındaki herhangi bir noktasına, çakıştırma noktası olarak Şekil 6.16’da gösterildiği gibi $\checkmark$ adı verilir,



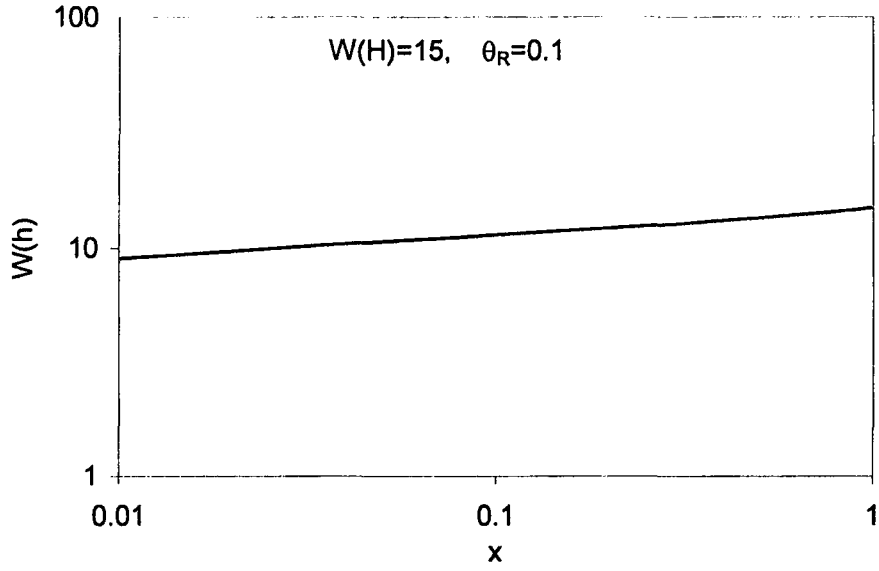
Şekil 6.16 – Doğrusal yaklaşım için tip eğri çakıştırması

- e) Model ve arazi kağıtlarında çakıştırma (matching point) noktasının koordinatları olan $x_C = 0.1$, $W_C(h) = 10$, $r_C = 50\text{ m}$, $h_C = 16\text{ m}$ ve $(\eta_R)_C = 0.01$ değerleri okunursa,
- f) Bundan sonra tesir yarı çapını belirlemek için 5.27 numaralı denklem kullanılırsa, $R = 500\text{ m}$ olarak hesaplanır.
- g) İletim kapasitesini belirlemek için 5.82 numaralı denklem kullanılırsa $T = 34000\text{ m}^2/\text{gün}$ bulunur.
- h) Ters mesafe faktörünü hesaplamak için 5.75 numaralı denklem kullanılırsa, $f = 2 \times 10^{-5}\text{ l/m}$ olarak hesaplanır.
- i) Hidrolik iletkenliğin azalma oranı olan a değerini belirlemek için 5.73 numaralı denklem kullanılırsa, $a = 2 \times 10^{-8}\text{ l/s}$ olur. k_c tüm hesaplamalarda 10^{-3} m/s olarak ele alınmıştır.

Sonuç olarak, doğrusal yaklaşım durumu için, akifer parametreleri $R = 500\text{ m}$, $T = 34000\text{ m}^2/\text{gün}$, $f = 2 \times 10^{-5}\text{ l/m}$ ve $a = 2 \times 10^{-8}\text{ l/s}$ değerleri hesaplanmıştır.

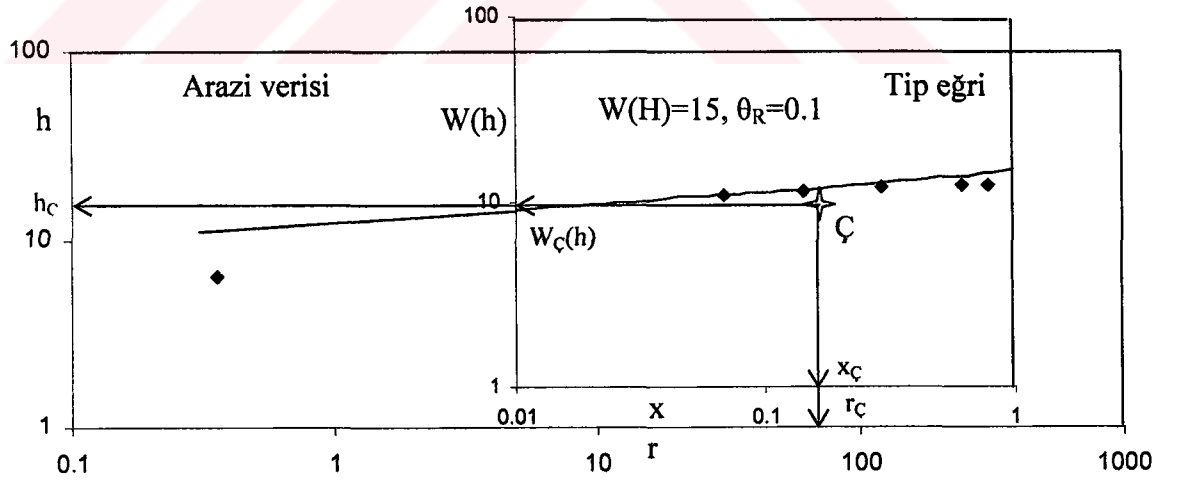
6.4.2 Üstel iletkenlik değişimi uygulamaları

- a) Önce mesafe-hidrolik yük verileri, çift-logaritmik kağıt üzerine yatay eksenle mesafe, dikey eksenle hidrolik yükler olacak biçimde işaretlenirse, Şekil 6.14 elde edilir.
- b) Sonraki adımlarda kullanılmak üzere, bu şekildeki saçılma diyagramı Şekil 6.14'de gösterildiği gibi çift logaritmik eksen üzerine işaretlenmiştir. Daha sonra mesafe ile hidrolik yük artışının teorik karşılığı olan x ile $W(h)$ değişimini veren tip eğri çift-logaritmik kağıt üzerine hazırlanır, Şekil 6.17'deki tip eğri elde edilecektir.



Şekil 6.17 – Üstel yaklaşım için arazi verisine en iyi uyum gösteren tip eğri

- c) Model ve arazi kağıtları sayısal ortamda hazırlandıktan sonra, modele göre mesafe-hidrolik yük verilerinin konumları görülebilir hale gelir. Model ve arazi kağıtları, arazi kağıdındaki mesafe-hidrolik yük eksenine model kağıdında x - $W(h)$ eksenleri paralel kalacak biçimde birbirine göre hareket ettirilerek, mesafe-hidrolik yük noktalarının tip eğri etrafına saçılan en iyi konumu Şekil 6.18’de gösterildiği gibi belirlenir,



Şekil 6.18 – Üstel yaklaşım için tip eğri çakıştırması

- d) Her iki kağıdın ortak olan herhangi bir noktasına Ç adı verilir,
- e) Model ve arazi kağıtlarında çakıştırma (matching point) noktasının koordinatları olan $x_C = 0.2$, $W_C(H) = 15$, $W_C(h) = 10$, $r_C = 80\text{ m}$, $h_C = 17\text{ m}$, $(\theta_R)_C = 0.1$ değerleri okunur,
- f) Bundan sonra tesir yarıçapını belirlemek için 5.27 numaralı denklem kullanılır, $R = 400\text{ m}$ bulunur.
- g) İletim kapasitesini belirlemek için 5.105 numaralı denklem kullanılır, $T = 32000\text{ m}^2/\text{gün}$ olur.
- h) Hidrolik iletkenliğin azalma oranı b değerini belirlemek için 5.98 numaralı denklem olan $\theta_R = b R$ kullanılır, $b = 2.5 \times 10^{-4}\text{ 1/s}$ olur. Sonuç olarak, akifer parametreleri $R = 400\text{ m}$, $T = 32000\text{ m}^2/\text{gün}$ ve $b = 2.5 \times 10^{-4}\text{ 1/s}$ olarak hesaplanır.

6.4.3 Pratik karşılaştırma

Bağımlı durum için elde edilen denklemler, literatürde (Şen, 1995) yayınlanmış olan farklı verilere tatbik edildiği takdirde aşağıdaki grafikler ve sonuçlar elde edilmektedir.

Uygulama alanına ait veriler, pompaj debisi $Q = 0,32\text{ m}^3/\text{s}$ olan, 3 m çapında tam nüfuz eden bir kuyudur. Kuyuların yerleşim planı Şekil 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.1'de sunulduğu gibi, pompaj tecrübesi dört adet gözlem kuyusunda tatbik edilmiş olup akiferin kalınlığı yaklaşık 20 m 'dir. Önceki bölümde anlatıldığı gibi yöntem tatbik edildiğinde, doğrusal yaklaşım için $R = 150\text{ m}$, $f = 6.7 \times 10^{-5}\text{ 1/m}$, $a = 6.7 \times 10^{-8}\text{ 1/s}$ değerleri bulunmuştur. Üstel yaklaşım için ise, akifer parametreleri $R = 140\text{ m}$, $b = 7.1 \times 10^{-5}\text{ 1/s}$ ve $T = 900\text{ m}^2/\text{gün}$ değerleri elde edilmiştir.

6.5 Genel Değerlendirmeler

Bağımlı durum için değişen hidrolik iletkenlik altında, üstel ve doğrusal yaklaşımlar için analitik çözümler elde edilmiş ve bu çözümlerin uygulaması yapılmıştır. Bu yaklaşımlara ait tip eğri demeti elde edilmiştir. Her iki yaklaşım için de elde edilen tip eğrilerinin üç farklı kısımdan meydana gelmesi, akiferin heterojen bir yapıya sahip olduğunun belirtisidir. Akiferin heterojen bir yapıya sahip olması, hidrolik

iletkenliğin sabit olamayacağı anlamına gelir. Daha açık bir ifadeyle, hidrolik iletkenliğin mesafeyle değişeceğini göstermektedir.

Eğrideki üç farklı kısım şu şekilde yorumlanabilir; yakın mesafeye karşı gelen kısımda değişim büyük, orta mesafeye karşı gelen kısımda değişim orta ve uzak mesafeye karşı gelen kısımda ise değişim küçüktür. Tip eğrinin eğimi, dinamik iletkenlik sayısını vermektedir. Dolayısı ile, yakın mesafeye karşı gelen kısımda dinamik iletkenlik sayısı büyük, orta mesafeye karşı gelen kısımda orta ve uzak mesafeye karşı gelen kısımda ise küçük olur.

Bağımlı durum için iki farklı iletim kapasitesi elde edilmiştir. Bunlardan birincisi, boyutsuz statik yük fonksiyonuna karşı gelen, başlangıçtaki iletim kapasitesi olan T_b 'dir. Bu $H \approx h$ olması durumunda ortaya çıkar. Diğeri ise T olan klasik iletim kapasitesidir.

Bu çalışmada iki farklı veri grubu kullanılmıştır. Her iki farklı veri grubunda da başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b , klasik iletim kapasitesi T 'den daha büyük bir değer olarak elde edilmiştir.

Birinci kısım veriler kullanılarak, doğrusal yaklaşım için, $T_b = 44000 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $T = 34000 \text{ m}^2/\text{gün}$, Thiem(1906)'e göre ise $T = 74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak bulunmuştur. Üstel yaklaşım için $T_b = 41000 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $T = 32000 \text{ m}^2/\text{gün}$, Thiem(1906)'e göre ise $T = 74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir. İkinci kısım verilerde ise, doğrusal yaklaşım için $T_b = 2600 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $T = 2300 \text{ m}^2/\text{gün}$, Thiem(1906)'e göre ise $T = 1700 \text{ m}^2/\text{gün}$, üstel yaklaşım için $T_b = 1100 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $T = 900 \text{ m}^2/\text{gün}$, Thiem(1906)'e göre ise $T = 1700 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir. Her iki uygulamanın sonucunda da, doğrusal ve üstel yaklaşımlardan elde edilen T_b başlangıçtaki iletim kapasitesi, T 'den daha büyük bir değer almaktadır. Bu fark, yaklaşık olarak % 10-20 mertebesinde değişmektedir. Bunun nedeni, başlangıçtaki iletim kapasitesinin, $H \approx h$ durumuna karşı gelmesidir. Akiferin verimini belirleyen esas parametre olan iletim kapasitesi T de göz önünde bulundurulacaktır.

Bağımsız ve bağımlı durum için bir karşılaştırma yapılacak olursa akifer parametrelerinin sayısal değerlerinde Tablo 6.3 ve Tablo 6.4'te gösterildiği gibi bir azalma görülmektedir. Bu nedenle, akifer parametrelerinin belirlenmesi için bağımlı durum modelinin daha uygun bir model olduğu söylenebilir. Her iki veri grubunda da elde edilen sonuçlara bakıldığında, bu parametrelerin değerlerinin azalması,

modelin uyumunu göstermektedir. Bunun yanında, ikinci kısım verilerde doğrusal yaklaşım için iletim kapasitesinin değeri artmıştır. Bunun nedeni de, doğrusal yaklaşımın bu akifer şartları altında uyumsuz bir model olduğunun görülmesidir.

Tablo 6.3 Bağımsız durum için akifer parametreleri

Akifer parametreleri	Bağımsız durum			
	Pakistan verileri		Şen (1995)	
	Doğrusal	Üstel	Doğrusal	Üstel
$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	4	4	0,32	0,32
$H \text{ (m)}$	20	20	20	20
$k_c \text{ (m/s)}$	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
$T_{Thiem} \text{ (m}^2/\text{gün)}$	74000	74000	1700	1700
$T \text{ (m}^2/\text{gün)}$	63000	96000	1900	1500
$R \text{ (m)}$	400	360	110	120
γ_R	0.4	-	0.3	-
u_R	-	1	-	0.1
$\alpha \text{ (1/s)}$	10^{-6}	-	$2.7 \cdot 10^{-6}$	-
$f \text{ (1/m)}$	0.001	-	0.0027	-
$\beta \text{ (1/m)}$	-	0.0027	-	0.0008

Tablo 6.4 Bağımlı durum için akifer parametreleri

Akifer parametreleri	Bağımlı durum			
	Pakistan verileri		Şen (1995)	
	Doğrusal	Üstel	Doğrusal	Üstel
$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	4	4	0,32	0,32
$H \text{ (m)}$	20	20	20	20
$k_c \text{ (m/s)}$	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
$T_{Thiem} \text{ (m}^2/\text{gün)}$	74000	74000	1700	1700
$T \text{ (m}^2/\text{gün)}$	34000	32000	2300	900
$T_b \text{ (m}^2/\text{gün)}$	44000	41000	2600	1100
$R \text{ (m)}$	500	400	150	140
$f \text{ (1/m)}$	$2 \cdot 10^{-5}$	-	$6.7 \cdot 10^{-5}$	-
a	$2 \cdot 10^{-8}$	-	$6.7 \cdot 10^{-8}$	-
$W(H)$	16	15	12	5
η_R	0.01	-	0.01	-
b	-	$2.5 \cdot 10^{-4}$		$7.1 \cdot 10^{-5}$
θ_R	0.01	0.1	0.01	0.01

Bağımsız hal, sadece hidrolik iletkenliğin değişken kabul edildiği durumdur. Doğrusal ve üstel yaklaşımlar için analitik çözümlerden elde edilen hidrolik iletim kapasitesi değerleri Thiem (1906) ile mukayese edildiğinde; bağıl hata, birinci veri grubunda doğrusal yaklaşım için %14, üstel yaklaşımda ise yaklaşık olarak %22 mertebesindedir. İkinci veri grubunda ise bağıl hata doğrusal yaklaşım için yaklaşık olarak %12 ve üstel yaklaşım için ise bu değer yaklaşık olarak %15 mertebesindedir. Görüldüğü gibi, her iki veri grubundan elde edilen iletim kapasitesi sonuçları Thiem (1906)'e göre farklı değerler göstermiştir.

Bu değerlerden biri Thiem (1906)'e göre daha büyük, diğeri ise daha küçük çıkmıştır. Önerilen yöntemle göre çözüm yapıldığında, elde edilen sonuçların doğruluğu kabul edilirse, Thiem (1906)'in yöntemi ile elde edilen değerlerden gerçeğe daha yakın sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır.

Bağımlı durumda, bilindiği gibi hidrolik iletkenliğin değişiminin yanında, hidrolik yük de göz önünde bulundurularak sonuca gidilmiştir. Burada, birinci veri grubunda elde edilen sonuçlar, Thiem (1906) ile mukayese edildiğinde bağıl hata doğrusal yaklaşım için %53 ve üstel yaklaşım için ise %56, ikinci veri grubunda elde edilen sonuçlarda ise doğrusal yaklaşım için %24 ve üstel yaklaşım için ise %46 olarak elde edilmiştir.

Bu sonuçlara bakıldığında, hidrolik iletkenlik ile hidrolik yük birbirine bağımlı olarak değişimi ele alınırsa, elde edilen sonuçlar Thiem (1906)'e göre daha küçük kalmaktadır. Bağımsız duruma göre kıyaslandığında ise, aradaki fark yine çok büyük değer almaktadır. Bu parametreler arasında akiferin verimini belirten iletim kapasitesi değerlerine bakıldığında, bağımlı durumdaki iletim kapasitesi, bağımsız durumdakine göre %40-50 mertebesinde daha küçük çıkmaktadır. Bu nedenle, bağımsız ve bağımlı durum analitik çözümlerinden elde edilen sonuçlara bakılarak, bağımlı durum için elde edilen analitik çözüm kullanılmalıdır.

7. SONUÇLAR, BULGULAR, YORUMLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, permanan akım halindeki basınçlı bir akiferde, tam nüfuz eden kuyularda akifer parametrelerinin ($T, f, \alpha, \beta, a, b, R$) belirlenmesinde, bağımsız ve bağımlı durumlardaki üstel ve doğrusal yaklaşımlar için analitik çözümler elde edilerek tip eğrileri çizilmiştir. Bu çalışmada, iki farklı veri grubu kullanılmış ve elde edilen sonuçlar klasik Thiem (1906) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bağımsız ve bağımlı durumlar da birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıda sıralanan sonuçlar çıkarılmıştır.

Bağımsız durum için:

- 1) Bağımsız durumda, Darcy Kanunu esas alınarak kuyudan itibaren hidrolik iletkenliğin mesafeyle doğrusal ve üstel olarak azaldığı kabulü ile analitik çözüm yapılarak, akifer parametrelerini tayin eden denklemler geliştirilmiştir.
- 2) Bağımsız durum için analitik çözümlere ait tip eğriler elde edilmiştir. Boyutsuz kuyu fonksiyonunun boyutsuz mesafe oranı ile değişimi olarak tanımlanan tip eğri, akiferin yapısı hakkında bir fikir vermesinin yanı sıra akifer parametrelerinin belirlenmesinde de kullanılır.
- 3) Bağımsız durumda elde edilen tip eğrinin üç farklı kısımdan oluştuğu düşünülebilmekte ve bu üç farklı kısım yorumlanarak bazı bulanık (fuzzy) bulgulara ulaşılabilmektedir.
- 4) Bağımsız durumda elde edilen bulanık kural tabanının, ileride yapılacak yeraltı suyu çalışmalarına katkı yapabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, yoğun işlem gerektiren geleneksel yeraltı suyu modelleri yerine, daha az ve daha basit işlemler gerektiren bulanık modellerin tercih edilmesi tavsiye edilir.
- 5) Bağımsız durumda, tip eğride üç farklı kısmın bulunması, akiferin heterojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

- 6) Bağımsız durumda, üstel ve doğrusal yaklaşımlarda akiferin verimini belirten en önemli parametre olan iletim katsayısı; T , farklı değerler almaktadır. Birinci veri grubu için T ; doğrusal yaklaşımda $63000 \text{ m}^2/\text{gün}$, üstel yaklaşımda $96000 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve Thiem (1906)'e göre ise $74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ değerlerini almaktadır. İkinci veri grubu için ise bu değerler sırası ile, $1900 \text{ m}^2/\text{gün}$, $1400 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $1700 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir.
- 7) Bağımsız durumda, birinci veri grubu için üstel yaklaşımda elde edilen T değeri, doğrusal yaklaşımda elde edilen T değerinden daha büyük çıkmıştır. İkinci grup verilere bakıldığında ise, tersine bir durum söz konusudur. Böyle farklı değerlerin ortaya çıkması kabul edilebilir bir durumdur. Bu sonuç, yapılan analitik çalışmaların doğruluğunu dolaylı yünden göstermektedir.
- 8) Bağımsız durumda, her iki veri grubunda da Thiem (1906)'e göre hesaplanan T değeri, doğrusal ve üstel yaklaşımlardan elde edilen T değerleri arasında çıkmaktadır. Buradan anlaşılabileceği üzere, Thiem (1906)'e göre hesaplanan değerlerin ortalama bir değere karşı geldiği yorumu yapılabilir.
- 9) Yeraltı suyu akım hız ifadesi düşünüldüğünde, üstel yaklaşımın uygun olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü yeraltı suyu akım hızı, hidrolik iletkenliğe bağlı olarak değişmektedir. Kuyuya yakın bölgede, yeraltı akım hızı daha büyük olacağından ve kuyular kullanıldıkça cidarlarında hidrolik iletkenlik artış göstereceğinden dolayı modelin her zaman için üstel yaklaşıma uygun olduğu söylenebilir.
- 10) Bağımsız durumda, doğrusal ve üstel yaklaşımlar için elde edilen iletim kapasitesi değerleri Thiem (1906) ile mukayese edildiğinde, bağıl hata birinci veri grubunda doğrusal yaklaşım için yaklaşık olarak % 14, üstel yaklaşım için ise % 22 mertebesindedir. İkinci veri grubunda ise bağıl hata, doğrusal yaklaşım için yaklaşık % 12, üstel yaklaşım için ise % 15 mertebesindedir. Önerilen yöntemle yapılan çözümün doğruluğu kabul edildiği takdirde, hidrolik iletkenliğin mesafe ile değişimi durumunda elde edilen sonuçların Thiem (1906)'de sunulan sonuçlardan daha gerçekçi olduğu söylenebilir.

Bağımlı durum için:

- 1) Yeraltı suyu akım hızı, hidrolik iletkenlik ve hidrolik eğimin birbirine bağımlı değişimi göz önünde bulundurularak ifade edilmiştir. Akifer parametrelerini belirleyen denklemler, bağımlı durum için yeniden geliştirilmiştir.
- 2) Bağımlı durum için, hidrolik iletkenlik $k(r)$ ile hidrolik yükün $h(r)$ çarpımı dinamik iletkenlik T_D olarak literatüre yeni bir tanım getirilmiştir. Dolayısıyla, yeraltı suyu akım hızı dinamik iletkenliğin değişimi olarak tanımlanmıştır. Bu tanımla akifer parametrelerini belirleyen denklemler genelleştirilmiştir.
- 3) Darcy Kanunu, bağımlı durumun özel bir halini ifade etmektedir.
- 4) Bağımlı durum için tip eğri, boyutsuz mesafe oranı ile hidrolik yükün değişimi olarak ifade edilir. Boyutsuz mesafe oranı ile hidrolik yük arasında artan bir ilişki gözlenmektedir. Bu durumda da, tip eğri üç farklı kısımdan meydana gelmektedir. Bu da akiferin heterojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca tip eğride bulunan üç farklı kısım ayrı ayrı ele alınmak suretiyle her bir eğri için bulunan akifer parametreleri, aslında literatürde yamalı akifer (Şen, 1987) olarak bilinen yaklaşımın çözümünü vermektedir. Bu nedenle, yamalı akifer yaklaşımı bağımlı durumun özel bir çözümü olarak adlandırılabilir.
- 5) Bağımlı durum için, tip eğrinin ilk kısmında eğim büyük, ikinci kısmında orta ve üçüncü kısmında ise küçüktür. Tip eğrinin eğimi, dinamik iletkenlik sayısını vermektedir. Dolayısıyla, dinamik iletkenlik yakın mesafeye karşı gelen kısımda büyük, orta mesafeye karşı gelen kısımda orta ve uzak mesafeye karşı gelen kısımda ise küçük olur.
- 6) Bağımlı durumda, iki farklı iletim kapasitesi elde edilmiştir. Bunlardan birincisi başlangıçtaki iletim kapasitesi olan T_b , diğeri ise klasik yöntemlerde kullanılan iletim kapasitesi olan T^* dir.
- 7) Bağımlı durumda birinci kısım veriler kullanılarak, doğrusal yaklaşım için T_b , $44000 \text{ m}^2/\text{gün}$, $T = 34000 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve Thiem (1906)'e göre ise $T = 74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak hesaplanmıştır. Üstel yaklaşımda ise bu değerler sırası ile, $41000 \text{ m}^2/\text{gün}$, $32000 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve $74000 \text{ m}^2/\text{gün}$ olarak hesaplanmıştır. İkinci kısım verilerinde ise bu değerler sırası ile, doğrusal yaklaşım için 2600

$m^2/gün$, $2300 m^2/gün$ ve $1700 m^2/gün$; üstel yaklaşım için ise $1100 m^2/gün$, $900 m^2/gün$ ve $1700 m^2/gün$ olarak elde edilmiştir. Her iki uygulamanın sonucunda da doğrusal ve üstel yaklaşımlardan elde edilen başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b 'nin, klasik iletim kapasitesi T 'den daha büyük olduğu görülmüştür. Bu değer yaklaşık olarak %10-20 mertebesinde bağıl hatayla değişmektedir.

- 8) Bağımlı durumda, başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b , $H \approx h$ olması ile elde edilen değerdir. Başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b , klasik iletim kapasitesi T değerinden daha büyük değer almaktadır. Ancak hidrolik yük farkının çok küçük olduğu halde, başlangıçtaki iletim kapasitesinin büyük çıkması, yeraltı suyu akım hızının sadece hidrolik yük farkının oluşması nedeniyle değil aynı zamanda hidrolik iletkenliğin değişmesiyle ilişkili olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile, başlangıçtaki iletim kapasitesi T_b ile klasik iletim kapasitesi T arasındaki fark, hidrolik iletkenliğin etkisini göstermektedir. Bu nedenle, akifer parametrelerinin belirlenmesinde hidrolik iletkenliğin değişiminin göz önünde bulundurulmasının yararlı olduğu düşünülmektedir.
- 9) Bağımlı durum için, akifer parametrelerinin sayısal değerlerinde bir azalma görülmüştür. Bu nedenle, akifer parametrelerinin belirlenmesinde bağımlı durum modelinin daha güvenilir, emniyetli bir model olduğu söylenebilir.
- 10) Bağımlı durumda elde edilen değerler, Thiem(1906)'in değerlerinden daha küçüktür. Bu karşılaştırma bağıl hata cinsinden yapılırsa, birinci veri grubu için doğrusal ve üstel yaklaşımda sırası ile, %53 ve %56, ikinci veri grubunda ise doğrusal ve üstel yaklaşım için sırası ile, %24 ve %46 olarak hesaplanmıştır.
- 11) Bağımlı durumda iletim kapasitesi, bağımsız duruma göre %40-50 mertebesinde daha küçük çıkmaktadır.

Bağımsız ve bağımlı durum için:

- 1) Bağımsız ve bağımlı durumlar için elde edilen akifer parametreleri göz önünde bulundurulduğunda, gözenekli ortam için üstel yaklaşımın uygun olacağı söylenebilir.
- 2) Bağımsız ve bağımlı durumlarda elde edilen analitik denklemler, boyutsuzlaştırılarak genel çözüm elde edilmiş ve permanan akım durumunda

grafiksel çakıştırma yöntemi için çözüm uygulanmıştır. Ayrıca, kuyunun tesir yarıçapının herhangi bir denklem kullanılmadan grafiksel yöntemle belirlenmesi sağlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Ahmad, N.**, 1998. Evaluation of groundwater resources in the upper middle part of Chaj Doab area, Pakistan, *Doktora tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Albertson, M.L., Barton, J.R., ve Simom, D.B.**, 1960. Fluid Mechanics for Engineers, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Ayres, F.**, 1990. Schaum's Outline of Theory and Problems of Differential and Integral Calculus, McGraw-Hill, New York.
- Barker, J. A. ve Herbert, P.**, 1977. Non-Darcy flow and its implications to seepage problem. *J. Irr. and Drain. Div.*, ASCE, **4**, 459-473.
- Barker, J. A., ve Herbert, R.**, 1982. Pumping test in patchy aquifers, *Ground Water*, **20**(2), 150 – 155.
- Basak, P.**, 1977. Non-penetrating well in a semi-infinite medium with non-linear flow, *J. Hydrol.*, **33**, 375.
- Bear, J.**, 1979. Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Boulton, N.S.**, 1963. Analysis of data from nonequilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage, *Proc. Inst. Civil Engineers*, London, **26**, 469-482.
- Cooper, Jr., H.H., ve Jacob, C.E.**, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **27**, 526-534.
- Darcy, H.**, 1856. Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon. Victor Dalmond, Paris, France.
- Dudgeon, C.R.**, 1964. Flow of water through coarse granular materials. Water Research Lab., University of New South Wales, **Report No.76**, Australia.

- Dudgeon, C.R., and Yuen, C.N., 1970.** Non-Darcy flow in the vicinity of wells, *Proceedings of Groundwater Symposium*, The University of New South Wales, Australia, October 1970, 13-27.
- Engelund, F., 1953.** On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sands, *Bull. Tech. Univ. Den.*, **4**, Copenhagen.
- Freeze, R.A. ve Cherry, J.A., 1979.** Groundwater, Prentice Hall, NJ,.
- Givan, C. V., 1934.** Flow of water through granular materials-Initial experiments with lead-shot, *Amer.Geophys. Union, 15th Annual meeting*, September 1934, 572-579.
- Gurr, C.G., Marshall, T.J. and Hutton, J.T., 1952.** Water movement in soil due to a temperature gradient. *Soil Sci.*, **24**, 335-344.
- Hantush, M.S., 1957.** Analysis of data from pumping test in leaky aquifers, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **37**, 701-714.
- Hantush, M. S., 1964.** Hydraulics of Wells, *Advances in hydroscience* (V.T. Chow, editor), **1**, 281-432, Academic Press, New York.
- Harlan, R.L., 1973.** Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil, *Water Resour. Res.*, **9**, 1314-1323.
- Hoekstra, P., 1996.** Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing, *Water Resour. Res.*, **2**, 241-250.
- Kutilek, M., 1969.** Non-Darcian flow of water in soils (Laminar region).1st IASH Symp. Fundamentals, Israel (Publ. by Elsevier, 1972), July 1969, 327-340.
- Laushey, L.M., ve Popat, Y., 1978.** Darcy's law during unsteady flow, *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, General Assembly of Bern, 284-299.
- Louis, C., 1969.** A steady of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, *Rock Mech. Res. Rep. No. 10*, Imperial College of Science and Technology, University of London, London.
- Maini, Y.N., 1971.** In Situ Hydraulic Parameters in Jointed Rock. Their Measurement and Interpretations, *Ph. D. Thesis*, Imperial College of Science and Technology, University of London, London.

- Meinzer, O.E.**, 1923. The occurrence of ground water in the united states, *U.S. Geol. Survey Water Supply Paper* , **489**, MA.
- Muskat, M.**, 1937 The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Medium, McGraw-Hill, New York.
- Nightangle, H. I., ve Bianchi, W. C.**, 1973. Groundwater recharge for urban use. *Ground Water*, **11**(6), 36-43.
- Neumann, S.P.**, 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resour. Res.*, **8**(4), 1031-1045.
- Papadopoulos, I. S. ve Cooper, H. H.**, 1967. Drawdown in a well of large diameter well, *Water Resour. Res.*, **3**, 241.
- Philip, J.R., ve de Vries, D.A.**, 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **38**, 222-233.
- Slepicka, F.**, 1961. The laws of filtration and limits of their validity, *Int. Assoc. Hydraul. Res. Proc. 9th Convention*, June 1961, 383-394.
- Snow, D.**, 1968. Rock fracture spacings, openings and porosities, *J. Soil Mech. Foun. Div.*, **94**(1), 73.
- Streltsova, T.D.**, 1978. Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. *Advances in Hydro science*, **11**, Academic Press, V.T. Chow, Ed., 357-423.
- Swartzendruber, D.**, 1969. The Flow of Water in Unsaturated Soils, Academic Press, New York, 215-292.
- Şen, Z.**, 1982. Type curves for large diameter wells near barriers, *Ground Water*, **20** (2), 274-277.
- Şen, Z.**, 1986. Volumetric approach to non-Darcy flow in confined aquifers, *J. Hydrol.*, **87**, 337-350.
- Şen, Z.**, 1987. Type curves in patchy aquifers, *J. Hydrol.*, **95**, 277-287.
- Şen, Z.**, 1988. Type curves for two-regime well flow, *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, **114** (12), 1461-1489.
- Şen, Z.**, 1988a. Analytical solution incorporating non-linear radial flow in confined aquifers. *Water Resour. Res.*, **24** (4), 601-606.

- Şen, Z., 1989. Nonlinear flow toward wells. *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, **115** (12), 193-210.
- Şen, Z., 1990. Dimensionless straight type lines for aquifer test, *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, **116** (9), 1145-1156.
- Şen, Z., 1995. Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers, CRC Press, Inc., Florida.
- Şen, Z., 2004. Modern Aquifer Tests for Porous Medium (Groundwater Hydraulics), Turkish Water Foundation, İstanbul.
- Şen, Z., ve Al-Baradi, A., 1991. Sample functions as indicators of aquifer heterogeneities, *Nordic Hyrol.*, **22**, 37-48.
- Şen, Z., ve Altunkaynak, A., 2004. Variable discharge type curve solutions for confined aquifers, *J. Amer. Wat. Resour. Ass.*, **40** (5), 1189-1196.
- Theis, C. V., 1935. The relation between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Am. Geophys. Union*, **2**, 519.
- Thiem, G., 1906. Hydrologische Methoden, J.M. Gebhart, Leipzig.
- Todd, D. K., 1985. International recharge projects. *Seminar on artificial recharge of groundwater*, Central Ground Water Board Gov. of India, Ahmedabad, September 1985, 23-26.
- Vandelberg, A., 1977. Pumping test in heterogeneous aquifers. *J. Hydrol.*, **34**, 45-62.
- Wilkinson, J.K., 1956. The flow of water through rock fill and its application to the design of dams. *Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on SMEE*, October 1956, 141-155.

ÖZGEÇMİŞ

18.11.1970 tarihinde Mardin'in Midyat ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Atatürk İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini ise Batman Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde 1998 yılında tamamlayan Abdüsselam ALTUNKAYNAK daha sonra yüksek lisans için İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Su Mühendisliği programına girmeye hak kazandı ve bu bölümden 2000 yılında mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini yaparken, 1999 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı 'nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı. Askerlik görevini tamamladıktan sonra 2000-2001 öğretim yılı kış yarıyılından itibaren yüksek lisansı bitirdiği bölüm olan Su Mühendisliği programında doktora çalışmalarına başladı. Üyesi olduğu uluslararası kuruluşlar, ASCE (American Society of Civil Engineers) ve yeraltı suyu ile ilgili olarak NGWA (National Ground Water Association) dır. Halen tez aşamasında Doktora çalışmasına devam etmektedir. Aralık, 2004.