

Sayı (Number): 1



Durağan Olmayan Yeraltı Suyu Hareket Denklemi

Zekâi Şen

Őubat (February) 2017
İstanbul - T¼rkiye

YERALTI SUYU K¼LLİYESİ
TURKISH WATER FOUNDATION
GROUNDWATER FACULTY

YERALTI SUYU BÜLTENİ : SAYI 1

Durağan Olmayan Yeraltı Suyu Hareket Denklemi

Zekai ŞEN

©2017 SU VAKFI

Tüm yayın hakları anlaşmalı olarak Su Vakfı'na aittir.
Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir, izinsiz çoğaltılamaz, basılamaz.

Basıma Hazırlayan :
Muhiddin YENİGÜN



SU VAKFI

Libadiye Cad. Doğanay Sokak No:6 Kat:4 Üsküdar İstanbul
Tel: (216) 412 3383 - Faks: (216) 412 3390
suvakfi@suvakfi.org.tr - www.suvakfi.org.tr

Durağan Olmayan Yeraltı Suyu Hareket Denklemi

Zekâi Şen

Su Vakfı

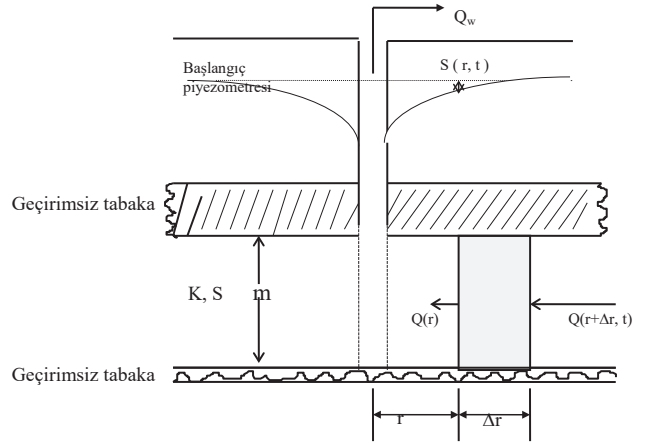
1. Giriş

Yapılacak kabullerin ışığı altında durağan olmayan yeraltı suyu hareketinin denklemini çıkarmak mümkündür. Şekil 1’de verilen ve basınçlı bir akifere tam nüfus eden küçük çaplı bir kuyu düşünelim. Akifer kalınlığı, m , hidrolik geçirimsizliği K , depolama katsayısı da S olsun. Kuyudan çekilen suyun sabit debisi de Q_w ile gösterilsin. Kuyudan pompa vasıtası ile su çekilmesi ile birlikte, kuyu civarında bir düşüm konisi meydana gelir. Yeraltı suyunun radyal olarak kuyuya doğru aktığını var sayalım. Yeraltı suyunun konsantrik ve r ile $r + \Delta r$ yarıçaplarında iki silindirik kesitten geçen debiler göz önünde tutulur. Akım durağan olmadığından dolayı bu iki silindirik yüzeyden geçen akımların debileri birbirine eşit değildir. Arada belirli bir fark vardır. İşte bu fark, o iki konsantrik silindir yüzeyin arasındaki akifer hacminde bulunan sudan kaynaklanır. Bu fark, aradaki akiferin depolama özelliğinden kaynaklanarak Δt zaman süresinde ortaya çıkar. Bu zaman süresinde piezometrik seviyede meydana gelen farkta, $\Delta h = h(r,t) - h(r, t + \Delta t)$ ’dir. İki silindirik yüzey arasında süreklilik denkleminin uygulanması ile

$$[Q(r,t) - Q(r+\Delta r,t)] \times \Delta t = S \times 2\pi r \Delta r [h(r,t) - h(r,t+\Delta t)] \quad (1)$$

elde edilir. Burada, $Q(r,t)$ ve $h(r,t)$ sırası ile r mesafesinde t anındaki debi ve piezometre

yüksekliğini gösterir. Bütün bu denklemlerde, r kuyu merkezinden akifer içinde düşünülen bir noktaya kadar olan yatay radyal mesafeyi gösterir. Limit olarak ($\Delta t \rightarrow 0$) ve ($\Delta r \rightarrow 0$) uygulanması ile Denklem (11) aşağıdaki kısmi türevli diferansiyel denklemi haline dönüşür.



Şekil 1. Basınçlı akiferde kuyuya doğru durağan olmayan akım

$$\frac{\partial Q(r,t)}{\partial r} = 2\pi S r \frac{\partial h(r,t)}{\partial t} \quad (2)$$

Konsantrik silindirik yüzeyden geçen $Q(r,t)$ ise

$$Q(r,t) = 2\pi r \times m \times V_f(r,t) \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $V_f(r,t)$, r radyal mesafe ve t zamanındaki özgül veriyi gösterir. Bununla, Darcy kanununa göre $V_f(r,t) = K \frac{\partial h(r,t)}{\partial r}$ olarak yazılması düşü-

nülebilir. Bu ifadenin Denklem (3)'de yerine konulması ile

$$Q(r,t) = 2\pi r m K \partial h(r,t) / \partial r = 2\pi r T \partial h(r,t) / \partial r \quad (4)$$

elde edilir. Denklem (4)'deki T iletgenlik katsayısının Denklem (2)'de yerine konulması ile

$$\partial^2 h(r,t) / \partial r^2 + 1/r \partial h(r,t) / \partial r = (S/T) \partial h(r,t) / \partial t \quad (5)$$

bulunur. Bu denklem bir basınçlı akiferdeki durağan olmayan yeraltı suyu akımını ifade eder. Eğer başlangıç piezometre yüksekliği h_0 ise, herhangi bir noktadaki t zaman sonraki düşüm $s(r,t) = h_0 - h(r,t)$ olup, düşümler cinsinden Denklem (5) şöyle yazılabilir.

$$\partial^2 s(r,t) / \partial r^2 + 1/r \partial s(r,t) / \partial r = (S/T) \partial s(r,t) / \partial t \quad (6)$$

2. Akifer parametrelerinin tesbiti

Yapılan birçok arazi çalışması sonunda elde edilen verilerden akifer parametrelerinin tespiti için gözenekli ortam kabulü yapılır. Bulunması istenen akifer parametreleri arasında porozite, hidrolik geçirimsizlik, iletkenlik katsayısı, depolama katsayısı, özgül verim, gecikmeli verim indeksi ve sızma faktörleri bulunur. Arazide elde edilen zaman-düşüm verilerinden uygun bir matematik modelinde alınması ile parametrelerin değerleri tespit edilebilir. Bu modeller akifer parametrelerine ilave olarak, kuyu ile ilgili bazı büyüklük ve pompa karakteristiklerinin de bulunmasına yarar. Böylece, tüm olarak bir yeraltı suyu haznesinin planlanmasında debiler, düşümler veya mesafeler ile işletme kuralları belirlenebilir. Şen(1995) tarafından belirtildiği üzere tam anlamı ile uygun bir akifer sınaması yapılıncaya, aşağıdaki bilgiler elde edilir.

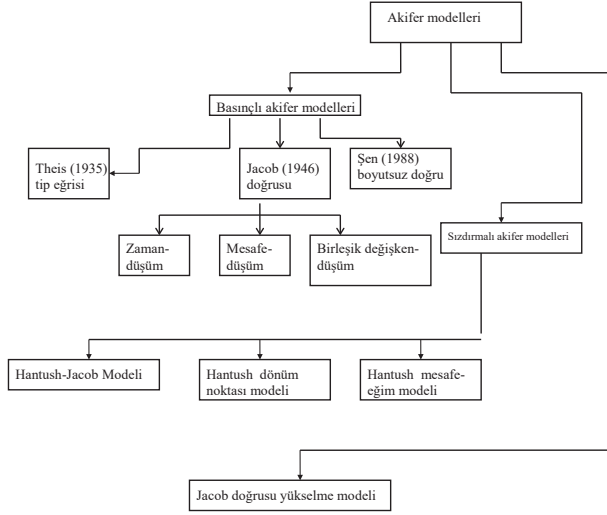
- Depolama ve iletim katsayıları ile özgül verim ve sızma faktörü gibi akifer parametrelerinin tahmini,
- Geçirimsiz ve geçirimsiz tabakalar mesafe, yön ve doğal durumlarının tespiti edilmesi,
- Kuyu etrafındaki yanal değişimler,
- Kuyu kayıpları, güvenilir debi, özgül düşüm ve özgül kapasite gibi kuyu 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 yapılması lazımdır. Bunların sonucunda, bu modeller vasıtası ile uygun çözümler elde edilebilir. Bir kuyuya doğru olan durağan olmayan akım halinde yapılması gerekli olan kabuller şunlardır.

- Akifer malzemesi homojen ve izotropdur,
- Akifer alansal olarak çok uzanımlı, yatay ve her yerde eşit kalınlığa sahiptir,
- Akım tabakalar halinde (laminer) ve Darcy kanunu geçerlidir,
- Sınama esnasında kuyu debisi sürekli olarak sabit kalır,
- Akiferin doygun tabakasını kuyu tamamen delerek tam nüfuz eder haldedir,
- Kuyu çapı son derece küçük ve en kesiti daireseldir,
- Kuyudan debinin çekilmeye başlaması ile beraber akiferin cevabı aniden olur. Bunun anlamı akiferden kuyuya su akımının aniden olmasıdır,
- Kuyu kayıpları diye bir şey yoktur,
- Akifer parametreleri uzay ve zamandan bağımsızdır,
- Yeraltı suyu sıkışabilir ve akifer malzemesi de elastik davranışa sahiptir.

Akifer türüne bağlı olarak bu kabullerin ışığı altında literatürde değişik kişiler tarafından sunulmuş çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Mesela, serbest yüzeyli akiferler için teorik ve uygulamalı çalışmalar Boulton (1954, 1955, 1963); Neuman (1972); Streltsova (1972, 1973) ve, Krozynski and Dagan (1975) tarafından; basınçlı akiferler için Theis (1935); Jacob (1940, 1950); Walton (1962); Şen (1986) ve, Marie ve Hollett (1996) tarafından verilmiştir. Sızdırmalı akiferler için ise teorik çözümler Hantush and Jacob (1955), Hantush (1956, 1957, 1959, 1960, 1961a, 1961b, 1964, 1966, 1967a,

1967b) ve Şen (1998) tarafından sunulmuştur. Akifer parametrelerinin değişik şartlar altında tespit edilmesi Ferris, Knowles, Browne ve Stallman (1962); Kruseman ve Rider (1979); Rushton and Holt (1981); Şen (1986); Corbitt (1990) ve Harlow and Lecain (1993) gibi araştırmacılar tarafından tamamlanan çalışmalarda verilmiştir. Genelde akifer parametrelerinin tespitinde kullanılan yöntemler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Akifer parametrelerini tesbit etmek için değişik modeller

10.1. Theis modeli

Denklem (6)'nın ısı transferi denklemlerine benzediği Theis (1935) tarafından fark edilmiş ve böylece izotrop ve homojen akifer ortamlar için uygun şartlar altında durağan olmayan yeraltı suyu akımının çözümü basınçlı bir akifer için

$$s(r,t) = h-h(r,t) = \frac{Q_w}{4\pi T} W(u) \text{ ve}$$

$$W(u) = \int_{-\infty}^u \frac{e^{-u}}{u} du \quad (7)$$

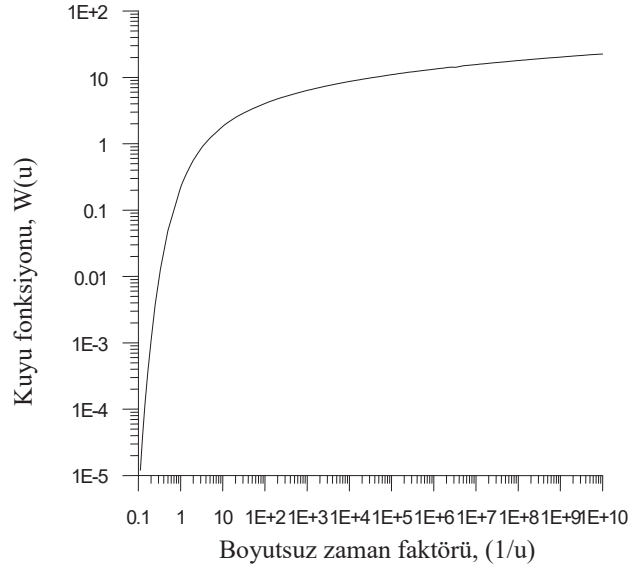
şeklinde verilmiştir. Burada Q_w kuyudan çekilen debi miktarını gösterir. $W(u)$ 'ya, u boyutsuz zaman faktörüne karşı gelen kuyu denklemi adı verilir. Denklemdeki $W(u)$ 'nin integrali üssel olduğundan sonsuz serilere açılması ile yaklaşık olarak aşağıdaki seri elde edilir.

$$W(u) = -0,5572 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2,2} + \frac{u^3}{3,3} - \frac{u^4}{4,4} + \dots \quad (8)$$

Boyutsuz zaman faktörü ve kuyu fonksiyonunun akifer parametrelerine bağıntılı açık ifadeleri

$$W(u) = \frac{4\pi T}{Q_w} s(r,t) \text{ ve } u = \frac{r^2 S}{4tT} \quad (9)$$

dir. Theis boyutsuz tip eğrisi Şekil 3’de verilmiştir. Bu eğrinin çizilmesi için gerekli sayısal değerler $W(u)$ 'nun u ile değişimi olarak Ekler kısmında ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 3. Theis boyutsuz tip eğrisi

2.2. Doğru (Jacob) metodu

Bu metot, kuyu fonksiyonu değerlerinin yarı-logaritmik eksen takımında boyutsuz zaman faktörüne karşı çizilmesi ile elde edilir. Denklem (7)'de, Theis tarafından durağan olmayan yeraltı suyu akımı için verilen ifadede, daha sonra Cooper ve Jacob (1946) kuyu fonksiyonu değerinin, u 'nun 0,01'den küçük değerleri için ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu görmüştür. İşte böyle bir ihmal sonrasında Denklem (8)'deki kuyu fonksiyonu aşağıdaki şekli alır.

$$W(u) = -0,5772 - \ln(u) \quad (10)$$

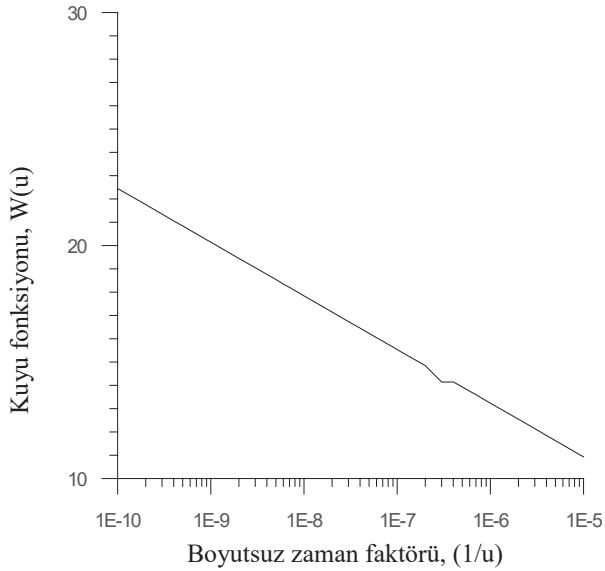
Denklem (9)'dan, u ve $W(u)$ değerlerinin bu son ifadede yerlerine konarak basit işlemlerin yapılması sonucunda

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \{-0,5772 - \ln(r^2 S / 4tT)\} \quad (11)$$

elde edilir. Bu denklam dahada basitleştirilerek

$$s(r,t) = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2S} \quad (12)$$

şeklini alır. Bu son denklem ile ifade edilen Jacob metodunun farklı üç uygulaması vardır. Bunlar zaman-düşüm, mesafe-düşüm ve t/r^2 şeklinde ifade edilen birleşik değişkenin düşümle değişmesi şekilleridir. Bütün bu yöntemler, zamanın büyük yani boyutsuz zaman faktörünün küçük olması durumları için geçerlidir. Bu durumlarda Theis eğrisinin sağ uç noktasının bir başka ifadesidir. Bunlar yarı-logaritmik ekseninde Şekil 4'de görüldüğü gibi bir doğru halindedirler.



Şekil 4. Jacob doğrusu

Bu üç yöntemde, Denklem (8)'den anlaşılacağı üzere r 'nin küçük ama t 'nin büyük değerleri için geçerlidir.

Zaman-düşüm yaklaşımı bir ana kuyudan sabit debi çekilmesi ve bir gözlem kuyusunda yeraltı suyu seviyesinin ölçülmesi ile elde edilecek veriler kullanılarak uygulanır. Bu modele göre, uzun zaman sonra elde edilen veriler yarı-logaritmik bir kâğıtta işaretlendiklerinde, zamanın logaritması ile düşüm noktaları arasından bir doğru geçirilir. İşte bu doğru biri eğim, Δs , diğeri de zaman ekseninde beliren kesim, t_0 olmak üzere iki sayısal değer okunmasına müsaade eder. Zaman eksenindeki bu kesim noktası

düşümün sıfır olduğu durumu verir. Büyük eğimler düşük özgül verimlerin olduğuna delalet eder. Bunun diğer anlamı, hidrolik geçirgenliğin az olmasıdır. Bununla doğru orantılı olarak ilgili olduğundan, iletkenlik katsayısı da düşük değerdedir. T ve S 'nin açık ifadeleri aşağıda verilmiştir

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta s_t} \text{ ve } S = \frac{2,25t_0T}{r^2} \quad (13)$$

Grafikten Δs_t eğimi, bir tam logaritmik devire düşey ekseninde karşı gelen düşüm farkı olarak okunur. Yukarıdaki denklemde Q ve r doğrudan arazi ölçümleri olarak belirlidir. S ve T ise hesaplanması gerekli akifer parametreleridir.

Düşüm konisinin zaman ve mekan olarak değişime uğradığı bilinmektedir. Mekanla ilgili değişimleri ölçmek için akiferin değişik yerlerine gözlem kuyuları yerleştirilir. Uzunca bir zaman geçtikten sonra bu gözlem kuyularında gözlenen düşümlerin logaritmik mesafelere karşı yarı-logaritmik eksen takımında işaretlemeler yapılırsa yine bir başka doğru elde edilir. Uzun zaman gerekmesinin sebebi durağan veya sanki-durağan yeraltı suyu akımına ulaşılacak içindir. Denklem (12)'den düşümün mesafe ile ters orantılı olduğu görülür. Bu sebeple buradaki doğru negatif eğim verir. Bu doğrunun düşümün sıfır olması durumuna karşı gelen yatay eksen kestiği nokta, doğrudan akiferin tesir yarıçapını verir. Bu yöntemin kullanılması için en azından üç adet gözlem kuyusunda ölçümlerin yapılması lazımdır. Denklem (12)'nin basit işlemlere tabi tutulması sonucunda kısaca

$$T = \frac{2,3Q}{2\pi\Delta s_r} \text{ ve } S = \frac{2,25t_0T}{r_0^2} \quad (14)$$

bulunur. Burada, r_0 ve t_0 sırası ile tesir yarıçapı ve düşümlerin aynı anlı olarak değişik gözlem kuyularında ölçülmesi zamanını verir. Bu son ifadedeki ilk denklem sağ tarafta eksi işarete sahiptir ama T 'nin hesabı artı işaretli olur, çünkü Δs_r eğimi eksi işarete sahiptir. Denklem (13)'deki T ve S ifadelerinin Denklem(13)'dekilerle karşılaştırılması

ile yarı-logaritmik kâğıttaki mesafe-düşüm doğrusu eğiminin zaman-düşüm eğrisinin iki katına eşit olduğu anlaşılır.

Üçüncü Jacob yönteminde birleşik değişken logaritmasının yatay ekseninde, düşümler ise düşey ekseninde gösterilmek sureti ile yine bir doğru ortaya çıkar. Birleşik mesafe-zaman değişkeni t/r^2 olarak hesaplanır ve değerler değişik zamanlarda yapılan ölçümler olabilir. Yarı-logaritmik kâğıtta elde edilen doğrunun eğimi Denklem(12)'den

$$\Delta s_r/t = \frac{2,3Q}{4\pi T} \quad (15)$$

olarak elde edilir. Buradan da T iletkenlik katsayısının ifadesi

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi \Delta S} \quad (16)$$

olur. Denklem (12)'nin biraz işleme tabi tutulması ile de depolama katsayısı S

$$S = 2,25 T \left(\frac{t}{r^2} \right) \quad (17)$$

elde edilir. Burada $(t/r^2)_0$ değeri doğrunun t/r^2 eksenini kestiği noktadır. Bu kesim noktasının her hangi bir fizik anlamı bulunmaz, sadece matematik bir tariftir.

Tüm Jacob doğru yöntemlerinin eğimlerinin kıyaslanması ile

$$\Delta s_t = \frac{\Delta s_1}{2} = \Delta s_{(t/r)} \quad (18)$$

olduğu anlaşılır. Bu bakımdan, zaman-düşüm ile birleşik değişken eğimlerinin eşit olduğu görülür.

Her üç Jacob yöntemi aynı veri dizileri olmasına karşılık aynı akifer parametre değerlerini vermez. Yüzey altı jeolojisinin kompozisyonuna göre her bir yöntemden elde edilen parametre tahmin değerleri birbirinden birazda olsa farklıdır. Akifer, Theis çözümleri yapılırken kabul edilen şartların hepsine tam anlamı ile uyarsa ve bu arada tam izotrop ve homojen ise, her üç yaklaşımdan da elde edilen akifer parametre tahminleri birbirine eşit çıkar. Bunlar arasında sadece

bir gözlem kuyusuna gerek göstermesi bakımından arazide en ekonomik olarak kullanılabileni, zaman-düşüm yöntemidir. Buna karşılık mesafe-düşüm yaklaşımının kullanılması çok pahalıdır. Çünkü en azından üç tane gözlem kuyusunun inşa edilmesini gerektirir. Ancak bu yöntem de diğerlerinden elde edilemeyen akifer tesir yarıçapının değerini bulmaya yarar. Birleşik değişken yöntemi de aynen mesafe-düşüm yöntemi kadar gözlem kuyusuna gerek gösterir. Bu yöntemde, sınaama sırasında elde edilen tüm verilerin kullanılmasını temin etmesi bakımından, akifer parametrelerinin belki de en güvenilir olan sayısal değerlerini verir.

3. Mühendis ve araştırmacıların dayanışması

Yeraltı suyu potansiyelinin belirlenmesi için seçilecek çalışma grubunun belirlenmesi çok önemlidir. Burada takımdan araştırmacılar, mühendisler ve teknisyenler anlaşılmaktadır. Jeoloji, hidroloji, fizik, kimya, matematik ve istatistik temel bilimlerini hakkında bilgi sahibi kişiler, yeraltı suyu araştırma ve değerlendirme çalışmaları için en uygun olanlardır. Genel olarak pratikte, jeoloji yorumlamaları, yeraltı suyu bölgelerinin belirlenmesi ve konumların tespiti için bir jeolog veya tercihen hidrojeolog gereklidir. Ancak, yeterli bilgisi olmayan su mühendisleri ve sondajcılar ile jeofizikçiler de bu işlerde kullanılabilir. Tespit edilen yeraltı suyu haznelerinin modellenerek en iyi işletim çözümlerinin bulunması için fizikçi ve matematikçiler ile bilgisayarlılara da gerek vardır. Bunlardan ilki, yeraltı suyu parametrelerinin tespiti için analitik çalışmalar yapılabilir. Bu analitik çalışmaların çoğu, pratikte bulunan heterojen ve anizotropluk için katılmadan yapılmıştır. Bu sebeple de, sonuçların yorumlanmasında ve sayısal değerlendirilmesinde yaklaşımlar daima söz konusudur. Yeraltı suyu taşıyan tabakanın gözenekli, çatlaklı, erime boşluklu (karsitik), buzul artığı kayalık veya püskürük/başkalaşmış kristalli kayalık, çatlaklı kayalık gibi

durumlara hiç bakılmaksızın, çoğu zaman aşağıda izah edilecek olan ve yeraltı suyu hidroliğinin ilk dinamik modellemesi olan Theis tip eğrilerinin kullanılmasına yönelir. Hâlbuki bu analitik çözüm birçok başka kabulün yanında, homojenlik ve izotropluk kabullerini de içerir. Bu kabuller, gözenekli yani taneli (poröz) ortamlarda yaklaşık olarak geçerlidir, ama çatlaklı ve çözülme boşluklu akifer ortamlarında öyle değildir. Analitik denklemleri çıkaranlar veya kullananların çoğu jeolojik bilgilerden mahrum olduklarından dolayı, yapılan sayısal hesaplamalarda o derece doğru olmaz. Yapılan yaklaşımlar her bir yeraltı suyu hesaplama adımında artarak kendini gösterir. Yaklaşıklık dolayısıyla ile gerekli talebin karşılanamaması ve yeraltı suyunun en iyi biçimde işletilememesi durumlarına varılır. Bu gibi durumlarda, klasik yöntemlerin ne gibi kabuller ve yaklaşımlar içerdiğini düşünmeden uygulamak yerine, incelenen yeraltı suyu sorununun değişik fizik, hidrolojik ve jeolojik yönlerinin araştırılması ile yeni yöntemlere gidilmeye de çalışılmalıdır. Yeraltı sorunlarına sayısal yaklaşımdan önce, sözel ve mantıksal açılarından yaklaşmanın faydası vardır. Bu düşünceler daha sonra tatbik edilecek olan analitik yöntemlerin hangi sınırlar için geçerli olduğunun da tespit edilmesine yarar. Tabiattan elde edilen verilerin mekanik olarak hazır klasik bir modele taşınarak uydurulması ve ona göre yorum ve sonuçların değerlendirilmesi yararlı olmaz. Burada sözel ve mantıksal yaklaşımlardan kasıt sayısal yöntemlerin uygulanmasına zemin hazırlayacak tüm fizik ve jeolojik bilgilerin toplanarak sınıflandırılmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için tecrübeli hidrojeolog, hele kuvvetli bir fizik ve matematik geçmişi de varsa, çok yararlı olur. Benzer şekilde, gerekli jeoloji bilgileri ile teçhiz edilmiş bir inşaat mühendisi de yeraltı suyu sorunlarının çözümlenmesinde yardımcı olabilir veya esas rol oynayabilir. Değişik akifer matematik modellerinin uygulanması öncesinde,

sayısal olmayan bilgilere mümkün olduğu kadar fazlaca ulaşmaya gayret edilmelidir.

Kaynaklar

- Boulton, N. S. (1954). The drawdown of the water table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation, Proc. Inst. Civil Engrs., 3, pp. 564- 575.
- Boulton, N. S. (1955). Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage, Proc. Gen. Assembly Rome, Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub. 37, pp. 472-477.
- Boulton, N. S. (1963). Analysis of data from nonequilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage, Proc. Inst. Civil Engrs., 26, pp. 469-478.
- Corbitt, R. A. (1990). Standard Handbook of Environmental Engineering, pp. 5.34-5.40.
- Ferris, J. G., Knowles, D. B., Browne, R. H. and Stallman, R. W. (1962). Theory of Aquifer Tests, U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper 1536-E.
- Hantush, M. S. and Jacob, C. E.(1955). Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer, Trans. Am. Geophys. Un., vol. 36, pp. 95-100.
- Hantush, M. S. (1956). Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers, Trans. Am. Geophys. Un., vol. 37, pp. 702-714.
- Hantush, M. S. (1957). Nonsteady flow to a well partially penetrating in an infinite leaky aquifer, Proc. Iraq Scient. Soc., pp. 10-19.
- Hantush, M. S. (1959). Nonsteady flow to flowing wells in leaky aquifers, Jour. Geophys. Res. vol. 68, pp. 1043-1052.
- Hantush, M. S. (1960). Modification of the theory of leaky aquifers, Jour. Geophys. Res. vol. 65, pp. 3713-3715.

- Hantush, M. S. (1961a). Drawdown around a partially penetrating well, *Jour. Am. Soc. Civ. Engrs.*, vol. 87, pp. 83-98.
- Hantush, M. S. (1961b). Aquifer tests on partially penetrating wells, *Jour. Am. Soc. Civ. Engrs.*, vol. 87, pp. 171-195.
- Hantush, M. S. (1964), *Hydraulics of Wells*, *Adv. Hydrosoci.*, 1, pp. 281-305.
- Hantush, M. S. (1966), Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers, *Jour. Geophys. Res.*, vol. 71, pp. 421-426.
- Hantush, M. S. (1967a). Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer, *Jour. Geophys. Res.*, vol. 72, pp. 1909-1920.
- Hantush, M. S. (1967b). Flow of groundwater in relatively thick leaky aquifers, *Water Resources Res.*, vol. 3, pp. 583-590.
- Harlow, G. E. and Lecain G. D. (1993). Hydraulic characteristics and groundwater flow in coal bearing rocks of south western Virginia, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2388.
- Jacob, C. E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer, *Am. Geophys. Un. Trans.*, 72, pp. 574.
- Jacob, C. E. (1950), *Flow of Groundwater*, in *Engineering Hydraulics*, Rouse, H., Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 321-350.
- Krozyński, U. I. and Dagan, G. (1975). Well pumping in unconfined aquifers, the influence of the unsaturated zone, *Water Resour. Res.*, vol. 11, pp. 479-485.
- Kruseman, G. P. and De Rider, N. A. (1979). Analysis and evaluation of pumping test data, *Int. Inst. for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen, the Netherlands, PP. 15-22.
- Marie, J. R. and Hollett, K. J. (1996). Determination of hydraulic characteristics and yield of aquifers underlying Vekol valley, Arizona, using several classical and current methods, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2453, pp. 20-50.
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resour. Res.*, vol. 8, pp. 1031.
- Rushton, K. R. and Holt, S. M. (1981). Estimating aquifer parameters for large diameter wells, *Ground Water*, vol. 19, pp. 505-509.
- Şen, Z. (1986). Discharge calculation from early drawdown data in large diameter wells, *Jour. of Hydrology*, vol. 83, pp. 45-48.
- Şen, Z. (1988). Dimensionless time drawdown plots of late aquifer test data, *Ground Water*, 26(5),615.
- Şen, Z. (1991). Drawdown distribution during recovery around a large diameter well, *Nordic Hydrology*, 22, 253-264.
- Streltsova, T. D. (1972), Unsteady radial flow in an unconfined aquifer, *Water Resources Res.*, 8, pp. 1059-1066.
- Streltsova, T. D. (1973). Flow near a pumped well in an unconfined aquifer under non-steady conditions, *Water Resources Res.*, 9, pp. 227-230.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Am. Geophys. Un.*, 2, pp. 519-524.
- Walton, W. C. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation, *Illinois State Water Bull.* 49, pp. 81-83.



SU VAKFI

Libadiye Cad. Doğanay Sokak No:6 Kat:4 Üsküdar İstanbul
Tel: (216) 412 3383 - Faks: (216) 412 3390
suvakfi@suvakfi.org.tr - www.suvakfi.org.tr