

ARAŞTIRMA MAKALESİ Yeraltı suyunun çatlaklı ortamdaki gözenekli ortama değişken çaplı ve cidarı geçirimsiz kuyuya akışı

Yazışma yazarı:
Zekai Şen
zsen@itu.edu.tr

Zekai Şen

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Hidrolik ve Su Kaynakları, Maslak 34469, İstanbul Su Vakfı

Referans:
Şen Z., (2008), Yeraltı suyunun çatlaklı ortamdaki gözenekli ortama değişken çaplı ve cidarı geçirimsiz kuyuya akışı Su Kaynakları, 1, 39-55

Makale Gönderimi : 1 OCAK 2008
Online Kabul : 1 ŞUBAT 2008
Online Basım : 1 MART 2008

Özet Bu yazıda basınçsız gözenekli ortamdaki yeraltı suyunun düşey olarak önce yatay çatlaklara sonra da bu çatlak vasıtasıyla geniş, değişken çaplı ve cidarı geçirimsiz olan bir kuyuya akmasının matematik modeli geliştirilmiştir. Buna benzer kuyular yeryüzünün en üst kısmında Dördüncü jeoloji zamanına ait gözenekli ortamdaki akifer ve bunun altında çatlaklı bir basınçlı akiferin tamamen altında geçirimsiz jeoloji tabakalarının bulunması durumunda ortaya çıkmaktadır. Böyle bir akifer tabakalaşması durumunda yeraltı suyunun kuyuya gelmesini temsil eden tip eğriler gözenekli ve çatlaklı ortamlar için ayrı ayrı çıkartılmıştır. Kuyudan ilk su çekilmeye başlanması zamanlarında kuyu geniş çapının kuyudaki yeraltı suyuna etkisinin ne olabileceği açıklanmıştır. Bulunan genel çözümlerin literatürde bulunan klasik Theis, Hantush ve Jacob çözümlerine indirgenemediği gösterilmiştir. Kuyudan uzun zaman süresinde su çekilmesi durumunda zaman-düşüm grafiğinin Jacob doğrusuna uymayacağı, bunun yerine değişik şartlarda değişik doğruların ortaya çıkacağı anlatılmıştır. Böylece literatürde sanıldığı gibi Jacob doğru yönteminin her türlü akiferde kuyulara doğru olan yeraltı suyunu uzun zamanlarda değerlendirmeye yetmeyeceği doğrunun eğimi göz önünde tutularak belirtilmiştir. Geliştirilen yöntemin uygulanması Suudi Arabistan'dan elde edilen zaman-düşüm verileri için gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çatlak, değişken geniş çap, Dördüncü zaman, duragan olmayan akış, gözenek, Kurak bölge, tip eğri, tip doğru.

Groundwater flow from fractured layer to porous-media blind variable large diameter well

Abstract In this paper, unconfined porous medium is considered to drain vertically to underlying fractured aquifer, which leads groundwater to a variable large diameter well blind to porous medium. Such cases are quite common in arid regions, where the geological layers have top to bottom sequence as Quaternary sedimentary layer (porous-unconfined aquifer), weathered and/or fractured underlying layers (fractured-confined aquifer) which are underlain by impervious rock formation. The necessary type curves are provided both for the fractured (pumped) and overlying porous (unpumped) media. Initially, the effect of varying well diameter on the drawdown is explained. The general groundwater movement equation for this configuration yields to well known Theis, Hantush and Jacob solutions. It is also indicated that at large times, classical Jacob straight-line is not valid in every case, because there is a set of other straight-lines with different slopes. The application of the methodology is presented for an aquifer test in the Kingdom of Saudi Arabia.

Keywords. Arid region, fracture, porous, unsteady flow, Quaternary deposits, variable large diameter, type curves, type straight-lines.

1. Giriş

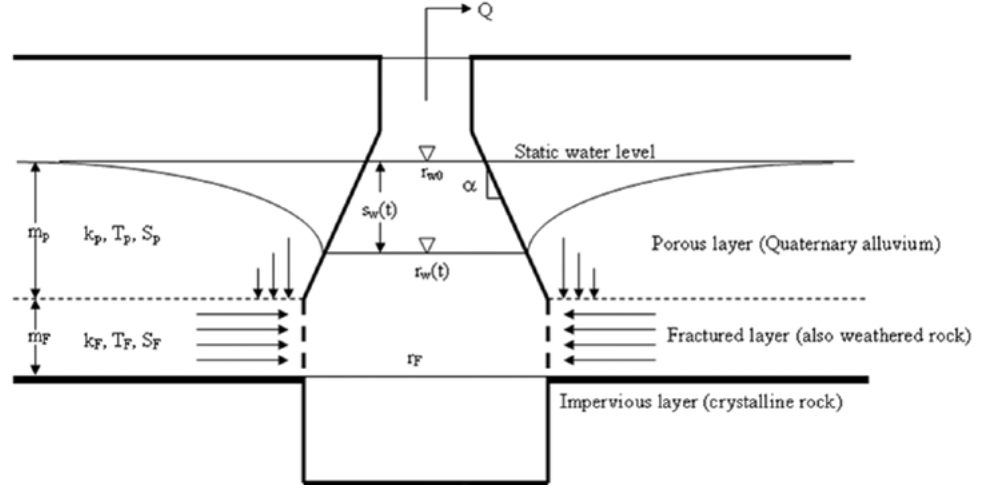
Kurak bölgelerde yeraltı suyu sığ ve derin tortul tabakalarda bulunmaktadır. Dördüncü zaman jeoloji tabakalarındaki yeraltı suları sığ akiferlerdir ve bu tabakaların birikmesinden önceki zamana ait tabakaların yüzeyi sıcaklık farkından ve hava şartlarının etkisinden dolayı yer yer çatlaklı hale gelmiştir. Böylece, Dördüncü zaman tabakalarının altında içlerinde basınçlı yeraltı suyu bulduran ve göreceli olarak suyun çatlaklarında kolayca akmasını sağlayan ancak depolanmasına o derece müsade edemeyen çatlaklı ortamlar bulunmaktadır. Bu ortamlardaki geçirimli tabakalar değişik oranlarda eş-türlü (homojen) olmayışları çatlaklar, kılcal çatlaklar ve küçük boşlukları ihtiva ederler (Gerke and van Genuchten, 1993). Bu jeolojik yapılar büyük ölçekte yeraltı suyu akışına sebep olur böylece de değişik hızlarda üniform olmayan yeraltı akışları ortaya çıkmaktadır.

Klasik çatlaklı ortamlar biri çatlakları diğeri de gözenekli kısımları içeren iki kısımdan meydana gelmiştir. Bu tür yapılara birbiri içine girmiş çifte geçirimli ve sürekli ortam adı verilir. Bunlardan birincisine gözenekli yapı adı verilir ki bunun depolama kapasitesi yüksek, ama yeraltı suyunun akışına zor müsade eder, çatlaklı ortam ise az su depolamasına karşılık daha kolay bir şekilde yeraltı suyunun hareket edebilmesine müsade ederler. (Bai et al., 1993). Yeraltı suyu akışı hem gözenekli hem de çatlaklı ortamda beraberce aynı zamanda akarlar. Aynı zamanda gözenekli ve çatlaklı ortamlar arasında da gözenekli ortamdan onu saran çatlaklara doğru yeraltı suyu akımları bulunur. Çatlaklar yeraltı suyunun akış mecralarını gözenekli bloklarda bu çatlaklara suyunu veren kaynakları teşkil ederler. Çatlaklı ortamların yeraltı suyu hidrolik özellikleri daneli ve gözenekli klasik ortamların ortaya koyduğu geçirimlilik özelliklerinden oldukça farklıdır. (Barenblatt et al., 1960). Bir çatlaklı ortamda, çözümü oldukça kolay olan tek gözenekli ortamın yeraltı suyu hidrolik modelleri yeterli olmamaktadır. Barenblatt et al. (1960) ve Warren and Root (1963) gözenekli bloklardan çatlaklara yeraltı suyu akımının sanki durağanmış gibi kabul etmeleri sonucunda yaklaşık analitik çözümler ortaya koymuştur. Odeh (1965) ise Warren and Root (1963) tarafından ortaya konulan çözümleri genelleştirmeye çalışmış ve çatlak şebeke yapısı belirsiz olacak biçimde çözümler üretmiştir. Diğer taraftan, Kazemi et al. (1969) yeraltı suyunun tamamen durağan olmayan bir durumda olduğunu incelemiştir. Teorik olarak bu çözümlerin hangisinin daha iyi sonuç verdiği karar vermek pek mümkün değildir, ama durağanmışçasına yapılan çözümlerin durağan olmayanlardan daha iyi olarak yeraltı suyunun gözenekli bloklardan çatlaklara akışını matematik açıdan daha iyi temsil ettiği sonucuna varılmıştır (Şen, 2002).

Bu yazının gayesi gözenekli ortamdaki basınçsız akiferden düşey olarak beslenen çatlaklı-basınçlı bir yatay tabakadan beslenen değişken çaplı geniş kuyulara gelen yeraltı suyu akımının modellenmesi sonucunda kuyudan su çekilmesi ile ortaya çıkan zaman-düşüm verilerinin değerlendirilerek akifer özelliklerinin hesap edilmesine yarayan bir matematik modelin geliştirilmesidir. Kuyunun gözenekli ortam tabakasındaki cidarının geçirimsiz olduğu var sayılmaktadır. Gereklî tip eğriler çıkarılarak grafik halinde sunulmuştur. Çıkarılan modelin daha önceden değişik akifer durumları için ileriye sürülen Theis (1935), Hantush (1959) and Cooper ve Jacob (1946) çözümlerine indirgenebildiği gösterilmiştir. Uygulama Suudî Arabistan'dan elde edilen bu tür bir kuyu-akifer yapısına sahip olan bir kuyu için gösterilmiştir.

Geometri ve hidrojeoloji durumları

Doğru tanım ve boyutları ile bir kuyunun donanımının tesbit edilmesi yeraltı suyu hareketini modelleyen yaklaşımların geliştirilmesi için önemli bir temel teşkil eder. Burada, Şekil 1'de gösterildiği üzere değişken ve geniş çaplı bir kuyu göz önüne alınmıştır.



Şekil 1 Kuyu-akifer konfigürasyonu

Kuyu ve onu saran akifer içindeki cidarının üst taraftaki başlangıç yarı çapı r_{w0} ile ve kuyu cidarının eğimi de α ile gösterilmiştir. Kuyudan su çekilmeye başlanması ile kuyudaki yeraltı suyu seviyesinin yarı çapı $r_w(t)$ kadardır ve bunu bilinen büyüklükler cinsinden

$$r_w(t) = r_{w0} + s_w(t)\tan\alpha \quad (1)$$

şeklinde ifade edebiliriz ki burada $s_w(t)$, t anında kuyudaki yeraltı suyu düşümünü gösterir.

Alışıl gelmiş modelleme yaklaşımlarında akifer maddesi gözenekli, çatlaklı veya bunların ikisinin bir arada bulunması (çifte gözenek) şeklinde düşünülür. Bu tür yapı matematik modellerin kolayca çıkarılmasına yardımcı olur, ama kurak ve yarı kurak bölgelerdeki Dördüncü (Kuvaterner) zamanların üst tarafındaki gözenekli ortamın altında çatlaklı bir tabaka ve onunda altında som kayadan ibaret geçirimsiz bir temel bulunur (bak. Şekil 1). Burada çatlaklı tabakanın kalınlığı, m_f , gözenekli ortam kalınlığından, m_p çok fazla küçüktür ($m_f \ll m_p$). Aşağıdaki noktalar böyle bir yapının şimdiye kadar alışıl gelmiş kuyu-akifer sisteminden olan farklılıkları gösterir.

1) Esas yeraltı suyu haznesi Dördüncü zaman jeoloji tabakası olan gözenekli ortamdadır. Kuyu en alttaki som tabakaya kadar ulaşır. Kuyunun bu derinliği zaman zaman ortaya çıkan kurak dönemlerde yeraltı suyu seviyesinin azalması sıralarında derinleştirilmesi ile tedricen ortaya çıkmıştır,

2) Dördüncü zaman tabakasının temelinde başkalaşmış ve çatlaklı tabakaların hidrolik geçirimsizlikleri daha fazladır, ama gözenekli tabakaya göre hazne yetenekleri çok azdır. Böylece bu tür yapılarda çatlaklı tabaka yeraltı suyunun hareketine kolaylıkla mücadele eden bir ortam olarak karşımıza çıkmaktadır, ve,

3) Temelde bulunan katı (som) kristal yapıları kayaçlarda da kılcal çatlaklıklar bulunabilir, ama bunların kuyuya yeraltı suyu taşımadıkları bu çalışma var sayılmıştır. Dolayısı ile kuyu sadece yatay olan çatlaklı ortamdan beslenmektedir.

Alışıl gelmiş akifer modellemelerinde yeraltı suyu taşıyan tabakanın yatay olduğu kabul edilir. Kuyunun geometri ve hidrojeoloji şartlarına göre yeraltı suyu akışının aşağıda belirtilen noktalara göre ortaya çıktığı sonucuna varılır.

1) Kuyu geniş ve değişken çaplı olduğundan ilk çekilen suların kuyu haznesinden geldiği var sayılır,

2) Kuyu cidarının geçirimsiz olması nedeni ile gözenekli Dördüncü zaman ortamındaki yeraltı suyu akımının yatay olması mümkün değildir. Burada bu tabakadaki yeraltı suyunun alttaki yatay çatlaklı tabakayı besleyecek biçimde düşey olduğu kabul edilmiştir,

3) Yatay çatlaklı ortamda yeraltı suyu akımı yataydır ve sadece bu tabakanın kuyu ile hidrolik bağlantısı vardır. Başlangıçta basınç altında suyu kuyuya verir ama zaman geçmesi ile bu çatlaklı ortam sadece üstteki gözenekli ortamın yeraltı suyunu kuyuya ileten bir aracı vazifesi görür, ve,

4) Uzun zaman kuyudan su çekilmesi sonrasında gerek kuyu gerekse çatlaklı yatay tabakanın haznesinden yeraltı suyuna katkı biter ve kuyudan çekilen su sadece Dördüncü zaman gözenekli ortamından gelir.

Başlangıç kuyu haznesi durumu

Başlangıçtaki en önemli olay çekilen yeraltı suyuna sadece kuyu haznesinde katkının olması ve bunun zamanla azalarak sıfıra ulaşmasıdır. Bu nedenle başlangıçta çekilen su tıpkı bir silindirik hazneden çekilen suya benzeyeceğinden zaman ile yeraltı suyu düşüm miktarları arasındaki ilişki çifte-logaritmik bir kağıt üzerinde 45°lik bir doğru boyunca ortaya çıkar (Papadopoulos and Cooper, 1967). Bu doğrunun süresi kuyunun değişken olan yarı çapına bağlı olarak değişir. Başlangıçtaki yeraltı suyu çekiminin tamamen kuyu haznesinden gelmesi durumunda çekilen Q debisi ile kuyu yarı çapı, $r_w^2(t)$, zaman, t, ve kuyudaki yeraltı suyu düşümü, $s_w(t)$, arasındaki bağıntı kolayca

$$Q = \pi r_w^2(t) \frac{ds_w(t)}{dt} \quad (2)$$

olarak bulunur. Denklem (1)'in burada yerine konulması sonucunda,

$$Q = \pi \left[r_{w0} + s_w(t) \tan \alpha \right]^2 \frac{ds_w(t)}{dt} = \pi \left[r_{w0}^2 + 2r_{w0}s_w(t) \tan \alpha + s_w^2(t) \tan^2 \alpha \right] \frac{ds_w(t)}{dt}$$

elde edilir. Bununla düzenlenmesi ile ,

$$Q dt = \pi \left[r_{w0}^2 + 2r_{w0}s_w(t) \tan \alpha + s_w^2(t) \tan^2 \alpha \right] ds_w(t)$$

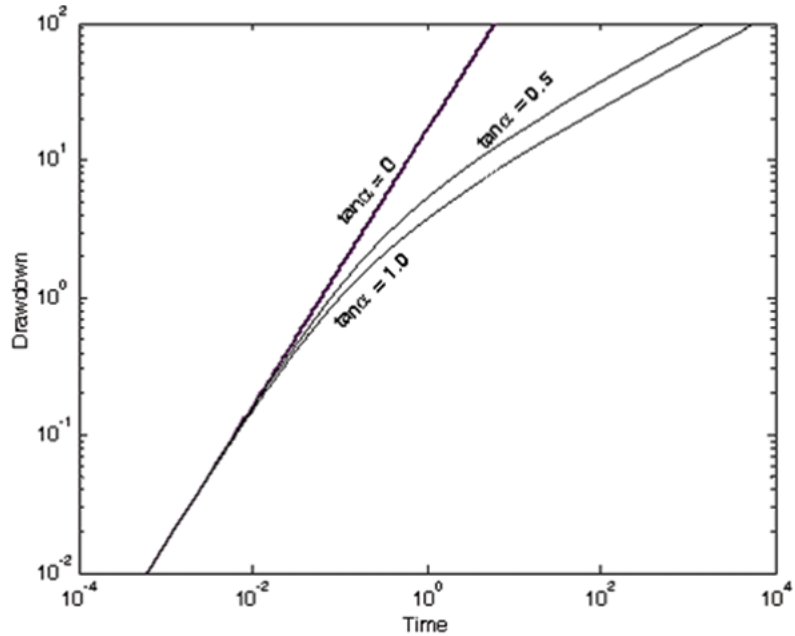
bulunur. Başlangıç şartlarını [t = 0 için Q = 0 ve $s_w(t) = 0$ 'dır] göz önüne tutarak,

$$Qt = \pi \left[r_{w0}^2 s_w(t) + r_{w0}s_w^2(t) \tan \alpha + \frac{1}{3}s_w^3(t) \tan^2 \alpha \right] \quad (3)$$

elde edilir. Kuyu çapının sabit olması durumunda $\alpha = 0$ olacağından klasik çözümlerin sonucu olarak,

$$Qt = \pi r_{w0}^2 s_w(t)$$

bulunur. Bu da çifte-logaritmik kağıt üzerinde 45°lik bir doğruyu belirler, ama değişik α değerleri için Denklem (3), Şekil 2'de verilen değişik eğrileri verir.



Şekil 2 Değişken çaplı kuyuda erken zaman-düşüm ilişkisi

Durağan olmayan matematik model

Yeraltı suyu hareketini belirlemekte süreklilik denklemi ile hidrolik eğim ile yeraltı suyu

hızı, $v(r,t)$, arasındaki bağıntıyı ifade eden Darcy kanununa ilave olarak hidrolik geçirgenlik, k , ve zamanın, t , da göz önünde tutulması ile bu kanun,

$$v(r,t) = -k \frac{ds(r,t)}{dr} \quad (4)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada $s(r,t)$ kuyu merkezinden r mesafede ve t anındaki akifer içindeki yeraltı suyu düşümü miktarını gösterir. Diğer taraftan, süreklilik denkleminin genel şekli Şen (1995 tarafından,

$$\frac{\partial v(r,t)}{\partial x} + \frac{\partial v(r,t)}{\partial y} + \frac{\partial s(r,t)}{\partial y} = \frac{S}{m} \frac{\partial s(r,t)}{\partial t} \quad (5)$$

olarak verilmiştir. where Burada S ve m sırası ile akifer maddesinin depolama katsayısı ile tabakanın kalınlığını gösterir. Denklem (4)'ün bu son ifadede yerine konulması ile,

$$\frac{\partial^2 s(r,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s(r,t)}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s(r,t)}{\partial t} \quad (6)$$

bulunur ki burada $T = mk$ akifer iletim katsayısını gösterir. Bu denklemin eldeki sorunun çözümü için aşağıdaki başlangıç ve sınır değerlerini göz önünde tutmak gereklidir.

1) eğer $t = 0$, $s(r,0) = 0$ ise (statik durum) yeraltı suyu tablası (piezometrik seviye) yataydır,

2) eğer $t = 0$, $Q = 0$ ise $t > 0$ için kuyudan su çekim debisi, Q , sabittir, ve

3) kuyudan çekilen debi ne olursa olsun büyük radyal mesafelerde ($r \rightarrow \infty$) ve her zaman düşüm sifıra eşittir, $s(\infty, t) = 0$.

Başlangıç çözümü kabulleri

Genel olarak, herhengi bir orta zaman, t , anında pompa debisine katkıda bulunan üç farklı katkı bulunur. Bunlar:

- 1) Kuyu haznesi katılımı debisi, $Q_w(t)$,
- 2) Gözenekli ortam debisi, $Q_p(t)$, ve,
- 3) Kuyu cidarındaki çatlaklı ortam debisi, $Q_f(t)$.

Bu debilerin her biri zamanla değiştiğinden hangi zamanlarda bunlardan hangilerinin kuyudan çekilen sabit debiye katkısının olduğu belirlenmelidir. Aşağıdaki akılcı düşünüş sonu ortaya çıkan durumlar sorunun çözümünde önemli rol oynarlar.

1) Genel olarak sabit çekim debisi üç farklı katkının toplamından ibarettir.

$$Q = Q_w(t) + Q_p(t) + Q_f(t) \quad (7)$$

2) Kuyu haznesi katkısı, $Q_w(t)$ erken zamanlarda Denklem (2)'den anlaşılacağı üzere sabit kuyu debisine eşittir, ama çekim zamanının uzaması ile kuyu haznesinin katkısı sifıra yaklaşır ve sabit debi,

$$Q = Q_p(t) + Q_f(t) \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3) Çatlaklı ortamdan olan debi, $Q_f(t)$, başlangıçta sıfırdır, ama zamanla en büyük değerine ulaşır. Çok uzun zamanlarda ne kuyu ne de çatlaklı ortam haznesinden sabit debiye katkı olur ve tüm debi gözenekli ortamın haznesinden kaynaklanır ve mantıken $Q = Q_f$ olur. Gözenekli ortam katkısından önce sabit kuyu debisi ,

$$Q = Q_w(t) + Q_f(t) \quad (9)$$

olarak belirir.

4) Çok büyük zamanlardan sonra her ne kadar gözenekli ortam çatlaklı ortamı beslese de bu katkının çatlaklı ortamdan kuyuya geçişi anlık olarak kabul edilir. Gözenekli

ortamın debisi sıfırdan başlayarak en büyük değerine kadar ulaşır, ve,

5) Uzun zaman sonra kuyu haznesi ve çatlaklı ortam katkısı sıfır olur ve tüm kuyu debisi sadece gözenekli ortamdan gelir. Bunun matematik olarak ifadesi $t \rightarrow \infty$ için $Q_w(\infty) \rightarrow 0$, ve $Q_F(\infty) \rightarrow 0$, ve $Q = Q_p(t)$ olur.

Eğer $v_F(t)$ çatlaklı ortamın kuyu cidarındaki yeraltı suyu hızı ise çatlaklı ortamdan kuyuya olan yeraltı suyu debisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$Q_F(t) = 2\pi r_F m_F v_F(t) = 2\pi r_F m_F k_F \frac{ds(t)}{dt} \quad (10)$$

burada r_F çatlaklı ortam içindeki kuyunun sabit yarı çapını, k_F ise bu tabakanın hidrolik iletgenliğini gösterir. Kuyu haznesi ve çatlaklı ortam haznesinden olan katkıları belirlemek için Dnkle (2)'nin Denklem (9)'da yerine konması yeterli olacaktır.

$$Q_F(t) = Q - \pi r_w^2(t) \frac{ds_w(t)}{dt} \quad (11)$$

Bu Şen and Altunkaynak (2004)'a göre değişken debili bir kuyu yeraltı suyu çekimine karşı gelir ve genel çözümü,

$$W(u) = \int_u^\infty Q(x) \frac{\exp(-x)}{x} dx \quad (12)$$

şeklinde dir. Burada $Q(x)$ değişken debiyi, u ve $W(u)$ sırası ile boyutsuz zaman faktörü ile kuyu fonksiyonunu gösterir ki bunların ilk tanımları Theis (1935) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$u = \frac{r^2 S}{4tT} \quad (13)$$

ve

$$W(u) = \frac{4\pi T}{Q} s(r, t) \quad (14)$$

Denklem (12)'de x boyutsuz zaman faktörünü gösterir. Aynı denklem sabit debi, $Q(x) = Q$ için basınçlı akifer Theis (1935) tip eğrileri ile aynı olur. Denklem (11)'in Denklem (12)'de yerine konması ile,

$$W(u) = \int_u^\infty Q \frac{e^{-x}}{x} dx - \pi \int_u^\infty r_w^2(t) \frac{e^{-x}}{x} \frac{ds_w(t)}{dt} dx \quad (15)$$

elde edilir. Değişken çaplı kuyu durumunu değerlendirmek için Denklem (1)'in yerine konulması ile de son olarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$W(u) = \int_u^\infty Q \frac{e^{-x}}{x} dx - \pi \int_u^\infty [r_{w0} + s(t) \tan \alpha]^2 \frac{e^{-x}}{x} \frac{ds_w(t)}{dt} dx \quad (16)$$

Gözenek-çatlak tabaka modeli

Şekil 1'de bir kuyu ile etrafında bulunan iki akifer tabakasının basit bir gösterimini içermektedir. Bunun esas akiferi Dördüncü zaman jeoloji tabakasından bulunan gözenekli ortamdır. Çatlaklı ortam ise göreceli olarak çok daha fazla geçirimlidir ve kuyudan su çekilmesine hemen cevap verir. Bu iki akifer arasında su alış veriş zamanla meydana gelir. Matematik çözümleme için aşağıdaki ilave kabullerin göz önünde tutulması gereklidir.

(i) Gözenekli ve çatlaklı akiferlerin her ikisi de alansal olarak çok yaygın, yatay ve sabit kalınlıktadır. Kalınlıkları geçirimli ve çatlaklı tabakalar için mF ve mP 'dir, (bak Şekil 1),

(ii) Herbir tabaka eş-değerli (homojen) ve eş-türden (izotrop) olup hidrolik iletkenlikleri k_F ve k_P 'dir. Akiferlerin elastik su depolama özelliğini temsil eden depolama katsayıları gözenekli ve çatlaklı ortamlar için S_F (T_F) ve S_P (T_P)'dir. Yatay çatlaklı tabakanın hidrolik iletgenliği gözenekli ortamından kat ve kat büyük olduğu için gözenekli ortamda yeraltı suyu akışı düşey çatlaklı ortamda ise yataydır, ve

(iii) Bundan önceki maddede verilen kabule göre Şekil 1'de gösterildiği üzere gözenekli

ortamdan olan kırılmış sızmaların yatay tabaka boyunca tedrici bir biçimde azaldığı anlaşılır (bak Şekil 1).

Kuyu hazne etkisi olmadan analitik çözüm

Sabit debi, Q , kısmen gözenekli akifer ve kısmen de çatlaklı ortamdan beslenir. Her ne kadar $Q_F(t)$ ve $Q_P(t)$ zamanla değişseler bile bunların toplamı Denklem (8)'den görüleceği üzere sabittir. Debiler düşüm konileri cinsinden Şen (1985) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmişlerdir.

$$Q_F(t) = S_F \frac{dV_F(t)}{dt} \quad (17)$$

ve

$$Q_P(t) = S_P \frac{dV_P(t)}{dt} \quad (18)$$

Burada $V_F(t)$ ve $V_P(t)$ sırası ile çatlaklı ve gözenekli ortamların düşüm konisi hacimlerini gösterir. Fizik olarak bu akiferlerden olan sızmalar dolayısı ile daima $V_F(t) < V_P(t)$ 'dir. Gözenekli ortamdan çatlaklı yatay tabakaya olan sızmanın çok küçük bir alandaki, $rdrd\phi$, miktarı sanki durağan akım yaklaşımı ile (Şen, 1985),

$$q_p(r,t) = -\frac{k_p}{m_p} [s_p(r,t) - s_f(r,t)] \quad (19)$$

şeklinde modellenebilir. Burada $q_p(r,t)$ gözenekli ortamda birim alana gelen düşey özgül debiyi; $s_p(r,t)$ ve $s_f(r,t)$ sırası ile gözenekli ve çatlaklı ortamlardaki düşümleri gösterir. Gözenekli ortamdan çatlaklı yatay tabakaya olan toplam beslenme Denklem (19)'dan aşağıdaki biçimde hesaplanabilir.

$$Q_p(r,t) = -\frac{k_p}{m_p} \int_0^{\infty} 2\pi r [s_p(r,t) - s_f(r,t)] dr$$

İntegralin uygun bir şekilde tamamlanması ile de,

$$Q_P(t) = -\frac{k_p}{m_p} [V_P(t) - V_F(t)] \quad (20)$$

Denklem (18) ve (20) arasında $Q_P(t)$ teriminin yok edilmesi ile gözenekli ortamdaki yeraltı suyu hareketi denklemi,

$$\frac{dV_P(t)}{dt} = \frac{k_p}{m_p S_P} [V_P(t) - V_F(t)] \quad (21)$$

olarak bulunur. Denklem (17) ve (18)'in Denklem (8)'de yerine konularak gerekli kısaltmaların yapılması sonucunda,

$$\frac{dV_P(t)}{dt} = \frac{Q}{S_p} - \frac{S_F}{S_p} \frac{dV_F(t)}{dt} \quad (22)$$

elde edilir. Son olarak da, Denklem (21)'in t'ye göre diferansiyelinin alınması ve Denklem (22)'nin göz önünde tutularak $dV_P(t)/dt$ teriminin yok edilmesi ile,

$$\frac{d^2 V_P(t)}{dt^2} = -\frac{k_p}{m_p S_P} \left(1 + \frac{S_P}{S_F} \right) \frac{dV_P(t)}{dt} + \frac{k_p}{m_p S_P S_F} Q$$

bulunur. Bu ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olup $V_P(0) = 0$ [ve $V_F(0) = 0$] şartlarına göre integralinin alınması ile birinci derece bir diferansiyel denklem haline gelir.

$$\frac{dV_P(t)}{dt} + \frac{k_p}{m_p S_P} \left(1 + \frac{S_P}{S_F} \right) V_P(t) - \frac{k_p}{m_p S_P S_F} Q t = 0$$

Boyutsuz depolama oranı parametresini aşağıdaki biçimde tanımlanması ile,

$$\eta = 1 + \frac{S_p}{S_F} \quad (23)$$

ve ters zaman boyutsuz faktöründe,

$$\beta = \frac{k_p}{m_p S_p} \quad (24)$$

Tanımlanması sonrasında en son diferansiyel denklem kısaca,

$$\frac{dV_p(t)}{dt} + \beta \eta V_p(t) - \frac{\beta}{S_F} Q t = 0$$

olarak yazılabilir. Bunun da çözümü,

$$V_p(t) = \frac{Q}{\eta S_F} \left[t - \frac{1}{\beta \eta} (1 - e^{-\beta \eta t}) \right] \quad (25)$$

olur. Diğer taraftan, çatlaklı ortamın düşüm konisinin ifadesi Denklem (21)'den

$$V_f(t) = \frac{Q}{\eta S_F} \left[t - \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) (1 + e^{-\beta \eta t}) \right] \quad (26)$$

olarak bulunur. Son olarakta, gözenekli ve çatlak ortamların debileri Denklem (10) ve (26)'nın Denklem (25)'de yerine konulması ile,

$$Q_p(t) = Q \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) (1 - e^{-\beta \eta t}) \quad (27)$$

ve

$$Q_f(t) = Q \left[\frac{1}{\eta} + \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) e^{-\beta \eta t} \right] \quad (28)$$

bulunur. Doğrulamak açısından bu iki denklemin toplamının Q'ya eşit olması gerekir. Şurası bir gerçektir ki $t \rightarrow 0$, olurken $Q_f(t) \rightarrow Q$ ve $Q_p(0) \rightarrow 0$ olur e böylece sabit debi, Q, sadece çatlaklı ortamdan gelir. Denklem (27)'nin göz önünde tutulması ile gözenekli ortam için boyutsuz aman faktörü ve kuyu fonksiyonu Denklem (13) ve (14)'e benzer olarak P indisinin kullanılması ile,

$$Q_p(u_p) = \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{4} \frac{\eta}{\eta - 1} \left(\frac{r}{L} \right)^2 / u_p \right] \right\} \quad (29)$$

Olur ki burada Hantush (1959) tarafından verilen sızma katsayısının

$$L = \sqrt{\frac{m_p m_F k_F}{k_p}}$$

şeklinde tanımlanması sonrasında çatlaklı tabakanın iletgenlik katsayısının $T_F = m_F k_F$, olduğu düşünülerek,

$$L = \sqrt{\frac{m_p T_F}{k_p}} \quad (30)$$

elde edilir. Burada gözenekli ortamın hidrolik direnç, c, kavramı da,

$$c = \frac{m_p}{k_p} \quad (31)$$

olarak tanımlanabilir. Denklem (27)'nin boyutsuz zaman faktörü ve kuyu fonksiyonu ile beraber düşünülmesi ile Denklem (13) ve (14) F indeksi ile,

$$Q_f(u_f) = \frac{1}{\eta} + \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \exp \left[-\frac{1}{4} \frac{\eta}{\eta - 1} \left(\frac{r}{L} \right)^2 / u_f \right] \quad (32)$$

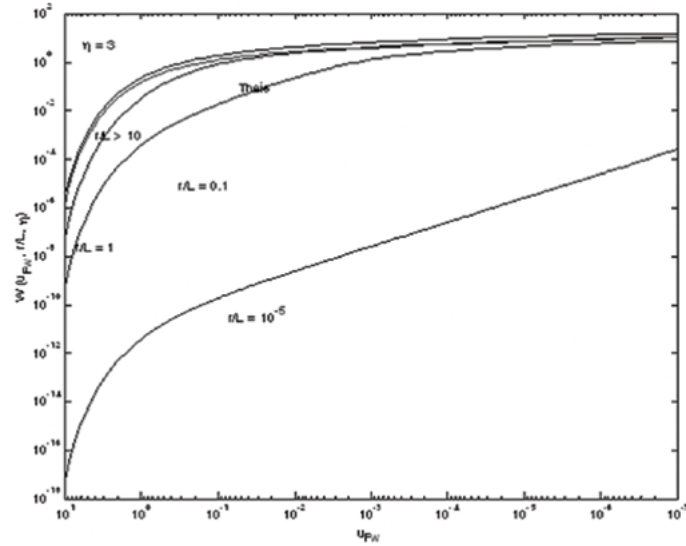
olur. Burada $r/L \rightarrow 0$ için çatlaklı ortamın ya kalınlığı sıfırdır veya hidrolik iletkenliği ihmal edilecek derecede küçüktür. Denklem (29)'un ve uygun kuyu fonksiyonunun Denklem (21)'de yerine konulması ile gözenekli ve çatlaklı ortamın tip eğri ifadeleri yapılan cebir kısaltmaları sonrasında,

$$W(u_p, \eta, r/L) = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \left\{ \int_{u_a}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx - \int_{u_a}^{\infty} \frac{e^{-x - \frac{1}{4\eta-1} \left(\frac{r}{L}\right)^2 / x}}{x} dx \right\} \quad (33)$$

ve

$$W(u_F, \eta, r/L) = \frac{1}{\eta} \int_{u_s}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \int_{u_s}^{\infty} \frac{e^{-x - \frac{1}{4\eta-1} \left(\frac{r}{L}\right)^2 / x}}{x} dx \quad (34)$$

bulunur. Denklem (34) klasik Theis (1935) ve Hantush (1959) çözümlerinin bir ağırlıklı formundan başka birşey değildir. Burada ağırlıklar basınçlı ve sızdırmalı akiferler için sırası ile $1/\eta$ ve $(1 - 1/\eta)$ 'dir. Denklem (34)'ün sayısal çözümleri Şekil 3'de çatlaklı akifer için değişik η ve r/L parametrelerine bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 3 Kuyu haznesi olmadan pompalanan akifer tip eğrileri

Kuyu hazne tesiri ile analitik çözümler

Sabit Q debisine gözenekli ortamdan olan katkı ilk zamanlarda kuyu haznesinde bulunan suyun etkisi ile fazla olmaz. Böylece sabit debi Denklem (7) ile ifade edilir. Burada $t \rightarrow 0$ oldukça $Q_F(t) \rightarrow 0$, $Q_P(t) \rightarrow 0$ ve

$Q_w(t) \rightarrow Q$ olur ama $t \rightarrow \infty$ için $Q_F(t) \rightarrow 0$, $Q_P(t) \rightarrow Q$ ve $Q_w(t) \rightarrow 0$ 'dir. Kuyudaki zaman-düşüm değişiminin elde edilebilmesi için önceki denklemde r yerine kuyu yarı çapı olan r_w konulmalıdır. Böylece u_p veya u_F yerine u_w 'nin konulması da söz konusudur. Denklem (2), Denklem (13), (14) boyutsuz zaman faktörü ile kuyu fonksiyonunda göz önünde tutularak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Q_w(u_w) = - \frac{u_w^2}{S} \frac{dW(u_w)}{du_w} \quad (35)$$

Kuyudan su çekiminin ilk zamanlarında çatlaklı akifer kuyu haznesi ile beraber katkıda bulunur ve böylece de tip eğri erken çözümleri için bu durum esas alınmalıdır. Böylece çatlaklı tabaka parametreleri ile Denklem (35),

$$Q_w(u_{Fw}) = - \frac{u_{Fw}^2}{S} \frac{dW_F(u_{Fw})}{du_{Fw}} \quad (36)$$

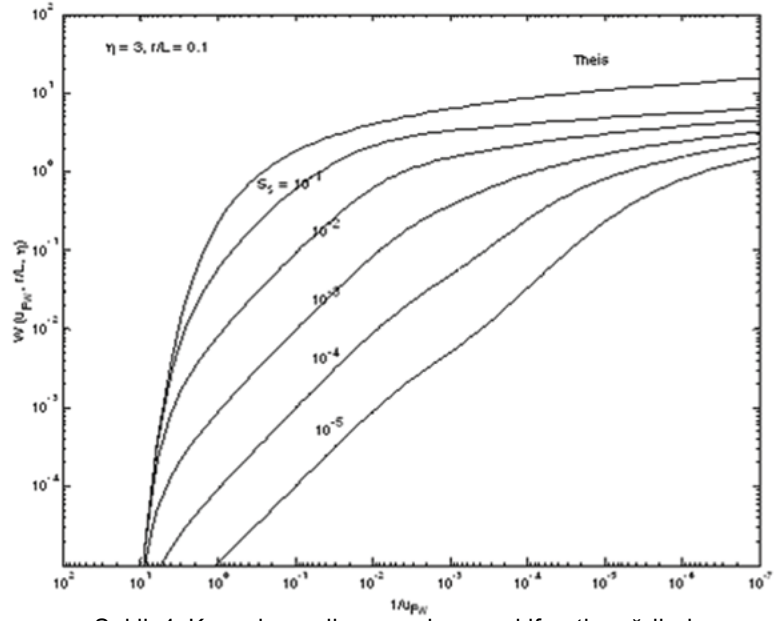
haline gelir. Buradan da Denklem (34)'deki ifadeye bu katkı da ilave olununca aşağıdaki durum elde edilir.

$$W(u_{Fw}, \eta, r/L) = \frac{1}{\eta} \int_{u_{Fw}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \int_{u_{Fw}}^{\infty} \frac{e^{-x - \frac{\eta}{\eta-1} \left(\frac{r}{L}\right)^2 / x}}{x} dx + \frac{1}{S_F} \int_{u_{Fw}}^{\infty} x e^{-x} dW(u_{Fw}) \quad (37)$$

Bu denklemin sayısal olarak çözülmesi için her iki tarafının türevinin alınması ile elde edilecek ifade

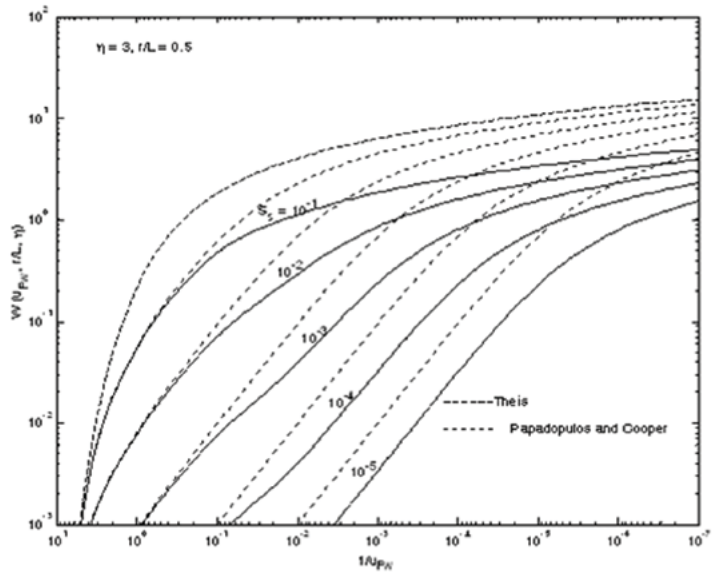
$$\frac{dW(u_{Fw}, \eta, r/L)}{du_{Fw}} = \left[\frac{1}{\eta} \frac{e^{-u_{Fw}}}{u_{Fw}} + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \frac{e^{-u_{Fw} - \frac{\eta}{\eta-1} \left(\frac{r}{L}\right)^2 / u_{Fw}}}{u_{Fw}} \right] / \left(1 + \frac{1}{S_F} u_{Fw} e^{-u_{Fw}}\right) \quad (38)$$

olur. Bunun sayısal çözümü çatlaklı akiferin depolama katsayısına bağlıdır. Şekil 4'de değişik parametre değerleri için sayısal çözüm grafikleri sunulmuştur.



Şekil 4 Kuyu hazneli pompalanan akifer tip eğrileri

Papadopulos and Cooper (1967) (PC) tarafından verilen geniş kuyu tip eğrileri ile kıyaslama yapmak için aynı sayısal çözümler Şekil 5'de bir arada gösterilmiştir.



Şekil 5 Değişik tip eğrileri

Bu yazarlar tarafından verilen tip eğrilerin bu yazıda çıkarılanlarla kıyaslaması yapılabilir. Kuyu haznesinin etkisi ilk zamanlarda kendisini gösterir ki bu durum Şekil 3'de verilen tip eğrilerinde yoktur. Şekil 5'deki tip eğrileri P tip eğrilerine göre daha kısa doğruları içerir. Yeni çıkarılan tip eğrilerin bazılarında kısmen S eğrisine benzeyen kısımlar

vardır ki bu çatlaklı ortamın gözenekli ortam tarafından beslendiği anlamına gelir. Uzun zaman sürelerinde (küçük u_{Fw} değerlerinde) PC eğrileri klasik Theis eğrisine yaklaşır, ama yeni çıkarılmış eğriler farklı bir gidişe (trende) sahiptir ve nerede ise Hantush (1959) sızdırmalı akiferlerdeki gibi yatay kısımlara yaklaşırlar. Çok uzun zamanlarda gözenekli ortamdan olan çatlaklı ortam beslenmesi kuyudan çekilen sabit debiye eşit olur ve bu durumda yatay kısımlara sebebiyet verir. Bu durumda çatlaklı akifer piezometrik seviyesi durağan hale gelerek tip eğrilerin son kısımlarının yataylaşmasına sebep olur.

Kuyu haznesi etkisi altında analytical çözüm

Çatlaklı ortam akiferindeki kuyu fonksiyonunun göz önünde tutulması ile Denklem (1)'den aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$r_w(t) = r_0 \left[1 + \frac{W(u_{Fw})}{W_0} \tan \alpha \right] \quad (39)$$

Burada

$$W_0 = \frac{4\pi T_F}{Q} r_0 \quad (40)$$

dir. Kuyu çapındaki değişim doğrudan boyutsuz olan kuyu fonksiyonunu etkilemez, ama Denklem (13)'de tanımlanan boyutsuz zaman faktörü Denklem (39)'da yerine konduktan sonra yeni şeklini şöylece alır.

$$u_{wd} = u_{Fw} \left[1 + \frac{W(u_{Fw})}{W_0} \tan \alpha \right]^2 \quad (41)$$

Burada u_{wd} değişken kuyu çapı halinde boyutsuz zaman faktörünü gösterir. Denklem (41), Denklem (38)'den bir kere u_{Fw} 'ye karşı gelen $W(u_{Fw}, \eta, r/L)$ 'in hesaplanmasından sonra onun Denklem (41)'de yerine konulması sonrasında değişken yarıçaplı kuyular için tip eğrilerin elde edilmesine yarar.

Tip doğruları

Teorik tip eğrilerin çoğu ve birbirine benzerliği eldeki arazi verilerine en uygun tip eğrinin tespit edilmesini zorlaştırır. Tip doğrular ise bu güçlüğü daha uygun hale getirilerek zaman-düşüm verilerine en uygun olanının bulunmasına yararlar. Teorik olarak $t \rightarrow \infty$ için $u \rightarrow 0$ olur ve böylece Denklem (33) ve (34)'in Denklem (37) ve (38)'e ilave olarak kuyu hazne etkisinin olması ve olmaması durumları için uzun zaman çözümleri elde edilir. Böyle bir sınır durumu için Denklem (33)'in sağ tarafındaki ikinci integral değiştirilmiş Bessel fonksiyonunun sıfır mertebeden ikinci çeşit hali olan ve zamandan bağımsız $K_0\{[r/L][\eta/(\eta-1)]\}$ haline gelir. İlave olarak sağ taraftaki birinci integralin de Cooper and Jacob (1946) tarafından verilen doğru denkleminin göz önünde tutulması ile Denklem (33) aşağıdaki şekli alır,

$$W(u_p, \eta, r/L) = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \left[-0.5772 - 2.3 \log(u_F) + K_0\left(\frac{r}{L} \sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}}\right) \right] \quad (42)$$

Benzer olarak Denklem (34)'den çatlaklı tabaka için,

$$W(u_F, \eta, r/L) = \frac{1}{\eta} \left[-0.5772 - 2.3 \log(u_F) \right] + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) K_0\left(\frac{r}{L} \sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}}\right) \quad (43)$$

elde edilir. Bu ifade yarı logaritmik bir eksende $W(u, \eta, r/L)$ ve u arasında doğru şekilde bir bağıntıyı gösterir. Denklem (43)'ün aşağıdaki iki uç noktayı da içediğine dikkat etmelidir.

(i) büyük r/L değerleri yani $\eta \approx 2.6$ fizik olarak basınçlı bir akiferi temsil eder ve bu nedenle Denklem (43) Jacob doğrusunu temsil eder.

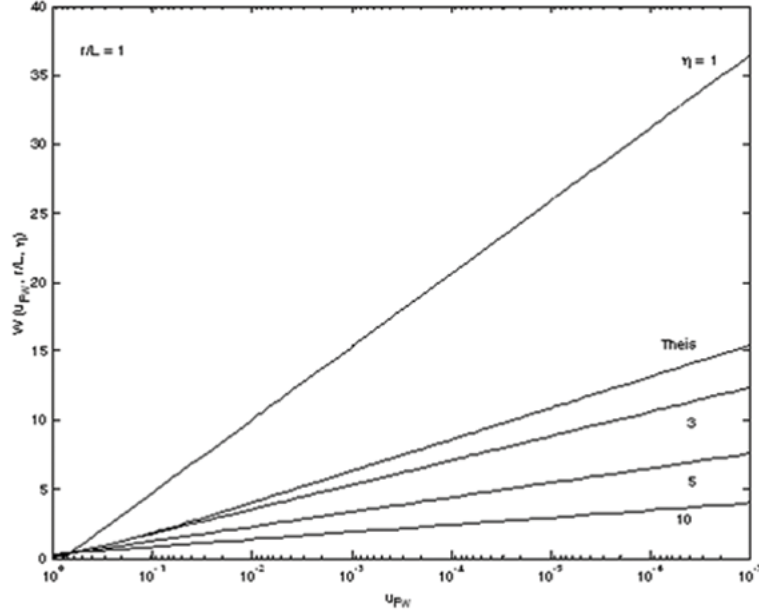
$$W(u_F, \eta) = -0.5772 - \ln(u_F) \quad (44)$$

(ii) $\eta \rightarrow \infty$, $S_p > S_F$ olmasını gösterir ve bu durum Hantush(1959) tarafından geliştirilen sızdırmalı akifere karşı gelir. Bu durumda Denklem (43),

$$W(u_F, \eta, r/L) = K_0 \left(\frac{r}{L} \right) \quad (45)$$

şeklini alır. Bu da $t \rightarrow \infty$ için De Glee (1930) tarafından verilen durağan akımlı sızdırmalı akifer denklemdir.

$K_0 \{ [r/L][\eta/(\eta-1)] \}$ 'nin değeri r/L ve η değerleri ile tablolardan veya günümüzde yaygın olarak kullanılan yazılımlarda verilen Verilen bir takım r/L ve η değerleri için Denklem (43)'den elde edilecek sonuçlar Jacob doğrusu olarak Şekil 6'da sunulmuştur. Aşağıdaki noktalar pratik bazı bilgileri içerir.



Şekil 6 Geç zaman pompalanan akifer tip doğruları

(i) Buradaki doğrular her yarı-logaritmik eksen takımındaki her doğrunun Jacob yönteminin uygulanması anlamına gelmeyeceği anlaşılır, (Şen, 1990),

(ii) çok büyük η değerleri için doğrular yatay hale gelir ve bu da pompa ile çekilen suyun akiferden alınan su miktarına eşit olduğunu gösterir. Bunun bir diğer anlamı çekilen su miktarı ile pompalanmayan akiferden alınan suyun birbirine eşit olduğudur. Klasik doğru yönteminde doğrunun eğiminin akifer iletim katsayısı ile ters orantılı olduğu bilinir (Cooper and Jacob, 1946). Bu da daha fazla açıklama getirilmeden klasik doğru yönteminin akifer iletim katsayısını fazla öngörür ve,

(iii) pompalanan akifer doğrusunun yatay eksenindeki kesim noktası Jacob doğrusununkinden daha büyüktür. Depolama katsayısı ise Jacob doğrusu kesim noktası ile doğru orantılıdır. Bu sebeplerle Jacob yöntemi kesim noktası değerinin gerekli denkleme yerine konulması sonucunda depolama katsayısı gereğinden az öngörülür,

Eğer doğru düşümün sıfır olduğu yatay zaman eksenini kesinceye kadar uzatılırsa, elde edilen kesimin koordinatları $W(u_F, \eta, r/L) = 0$ ve $u_F = u_{F0}$ olur. Bunlar yarı logaritmik eksen takımında işaretlenen arazi verilerinin sırası ile $s_{Fw} = 0$ ve $t = t_0$ veri değerlerine karşı gelir. Bu değerlerin Denklem (43)'te yerine konulması sonucu yapılan gerekli cebir işlemlerinden sonra,

$$u_{F0} = 0.56e^{(\eta-1)K_0 \left[\left(\frac{r}{L} \right) \left(\sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}} \right) \right]} \quad (46)$$

şeklini alır. Pompalanan akiferin boyutsuz zaman faktörünün göz önünde tutulması ile depolama katsayısı için aşağıdaki pratik formül elde edilir.

$$S_F = \frac{2.25T_F t_0}{r^2} e^{(\eta-1)K_0 \left[\left(\frac{r}{L} \right) \left(\sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}} \right) \right]} \quad (47)$$

Gözlem kuyusunun olmaması durumunda bu denklemden depolama katsayısının hesaplanması sorun çıkarır. Hesaplamalar etkin kuyu yarıçapı ile t_0 değerindeki belirsizlikten kaynaklanır (Cooper and Jacob, 1946). Eğer yarı-logaritmik grafik üzerindeki her doğru Jacob doğrusu olarak varsayılırsa Jacob yöntemi depolama katsayısı, S_j , $\eta = 1$ olduğu

göz önünde tutularak,

$$S_J = \frac{2.25T_J t_0}{r^2} \quad (48)$$

Şeklinde bulunur ki burada TJ Jacob yöntemi iletim katsayısıdır. Son iki denklemin kıyaslanması ile,

$$S_F = S_J e^{(\eta-1)K_0 \left[\left(\frac{r}{L} \right) \left(\sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}} \right) \right]} \quad (49)$$

bulunur. Burada üssel terim daima 1'den büyüktür ($S_F > S_J$). Bunun anlamı Jakob yönteminin depolama katsayısını düşük hesaplar. Diğer taraftan, $\Delta W(u_s, \eta, r/L)$, eğimi Denklem (43)'ten aşağıdaki şekli alır.

$$\Delta W(u, \eta, r/L) = \frac{2.3}{\eta} \quad (50)$$

Şen (1988; 1989; 1990; 1995) tarafından söylendiği üzere Jacob doğrusunun boyutsuz işaretlenmesinin eğimi 2.3'e eşittir. Denklem (50), $\eta > 1$ için pompalanan akiferin doğrusunun eğiminin Jacob yönteminkinden daha küçük olduğunu gösterir. Bu fizik olarak pompalanan akiferdeki düşüm hızının üst taraftaki pompalanmayan akiferin katkısı ile Jacob yöntemi eğiminden daha küçük olduğunu gösterir. Denklem (50)'deki kuyu fonksiyonunun göz önünde tutulması ile iletkenlik için pratik olarak sızdırmalı akifer için aşağıdaki formül elde edilebilir.

$$T_F = \frac{2.3Q}{4\pi\eta\Delta s} \quad (51)$$

Burada Δs yarı-logaritmik kağıtta uzun zamanlı arazi verileri arasından geçirilen doğrusunun eğimini gösterir. Bu ifade $\eta = 1$ için Jacob yöntemine eşit olur. Böylece, Jacob formülü ile Denklem (51)'in kıyaslanması sonucunda,

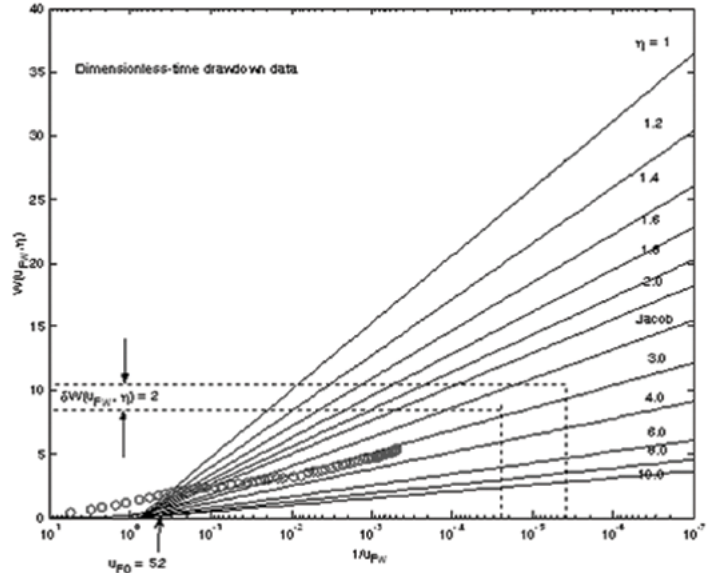
$$T_F = \frac{T_J}{\eta} \quad (52)$$

elde edilir. Bu ifade açıkça daima $T_F < T_J$ olduğunu gösterir.

Tüp doğru uygulaması

Arazide elde edilen zaman-düşüm verilerine tip doğru yönteminin uygulanması için aşağıdaki adımlara gerek vardır.

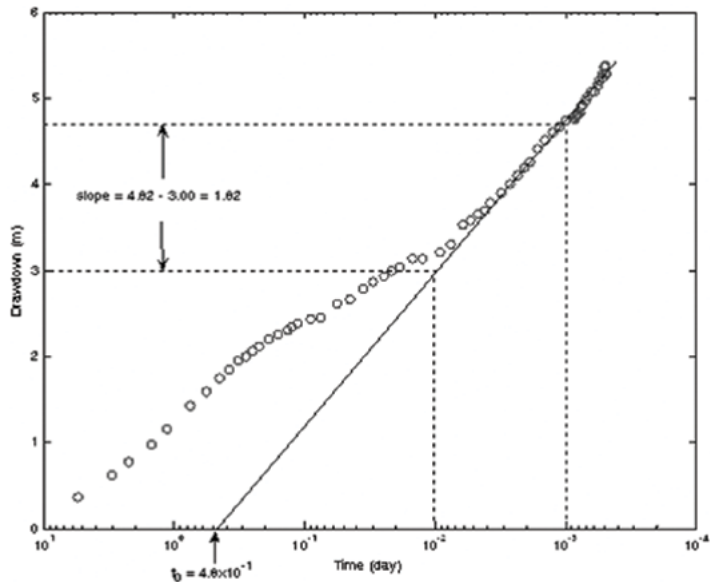
1. Geç zaman düşüm verilerini logaritmik yatay eksenle zaman verileri olmak üzere yarı-logaritmik kağıt üzerinde işaretleyin, (bak Şekil 7). Arazi verilerini en iyi temsil ettiği doğru $\eta = 3$ değerine sahiptir. Aynı şekilde, boyutsuz eğim $\Delta W(u_{Fw}, \eta) = 2$ olarak gösterilmiştir. Boyutsuz zaman faktörü yatay eksendeki kesim noktası olarak okunabilir ki burada düşüm sıfırdır. Gözlem kuyusunun bulunması durumunda aşağıdaki ilave noktalarında uygulanması gereklidir.



Şekil 7 Yarı-logaritmik kağıtta aman-düşüm verileri ve tip doğrular

2. Boyutsuz kesim değerini Şekil 7'den okuduktan sonra bunun Şekil 6'da $u_{F_0} = 5.2$ temsil edildiğine dikkat edilmelidir,
3. $\eta = 3$ değerinin Denklem (23)'de yerine konulması $S_p = 2S_F$ olduğunu gösterir ki bu da gözenekli ortamın depolama katsayısının çatlaklı ortamının iki katı olduğunu gösterir,
4. u_{F_0} 'nin Denklem (46)'da yerine konulması ile gerekli cebir işlemlerinin tamamlanması sonucu $K_0 \left[\frac{r}{L} \sqrt{\frac{\eta}{\eta-1}} \right] = 1.151$ bulunur.

Bu denklemin r/L için çözümü sıfırinci mertebeden Bessel fonksiyonunun kullanılması ile olur. Eğer gözlem ve esas kuyu arasındaki r mesafesi bilinirse buradan L değeri hesaplanabilir. Gerekli hesaplamalar $r/L = 0.31$ olduğunu gösterir. Akifer parametrelerinin elde edilmesi için Şekil 8'de verildiği gibi yarı-logaritmik kağıt üzerinde doğrunun belirlenmiş olması gerekir.



Şekil 8 Zaman-düşüm verileri ve uydurulan doğru

Bu şekilden önemli $\Delta s = 1.82$ ve $t_0 = 4.8 \times 10^{-1}$ değerleri okunur ki bunlarda zaten Jacob yönteminin uygulanması için gereklidir. Şekil 6'dan arazi verilerinin klasik Jacob yöntemi ile uyuşmadığı anlaşılır ama bu yazıda geliştirilmiş olan başka bir doğru ile uyum içindedir. Bu doğrudan da $\eta = 3$ ve $r/L = 0.31$ parametreleri belirlenir,

5. Pompa debisi, Q , bilindiğinden Denklem (51) pompalanan tabakanın iletgenlik katsayısının $80.5 \text{ m}^2/\text{day}$ olarak hesaplanabileceğini gösterir. Eğer doğrudan Jacob yöntemi iletgenlik katsayısı kullanılsa idi, Denklem (1)'de $\eta = 3$ 'ün yerine konulması ile iletgenlik

katsayısı 241.47 m²/day olarak elde edilir ki bu değer bu yazıda verilenden 3 kere daha büyüktür,

6. Depolama katsayısını hesaplamak için Jacob metoduna göre depolama katsayısının aşağıdaki denkleme göre hesap edilmesi gerekir (Cooper and Jacob, 1946),

$$S_J = \frac{2.25t_0T}{r^2}$$

Buradan da eldeki verilerden $S_J = 7.2 \times 10^{-2}$ bulunur. Gerekli değerlerin Denklem (49)'da yerine konulması ile pompalanan tabakanın depolama katsayısı 0.32 olarak bulunur,

7. Üçüncü adımda $S_p = (\eta - 1)S_F$ olduğundan pompalamayan akiferin depolama katsayısı hesaplanabilir,

8. Pompalanmayan akiferin depolama katsayısı Denklem (30)'dan hesaplanabilir,

$$\frac{m_p}{k_p} = \frac{L^2}{T_F}$$

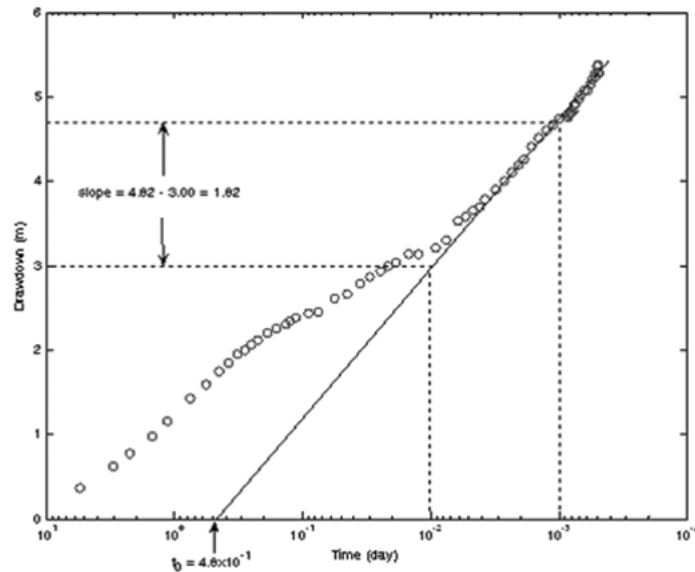
Buna benzer olarak iletim katsayısı tanımı ile alüvyum tabakasının doygunluk kalınlığı mP 'ninde göz önünde tutulması ile,

$$T_p = \left(\frac{m_p}{L} \right)^2 T_F$$

yazılabilir.

Tip eğri uygulaması

Çapı değişken olan Suudî Arabistan'daki bir kuyu 0.7 m kalınlığındaki çatlaklı bir tabakanın üzerindeki 11 m kalınlıktaki Dördüncü zaman alüvyonu içinde bulunmaktadır. Kuyu çapı 1.08 m ile 2.66 m arasında değişmektedir (bak. Şekil 1). Kuyu derinliği 12 m olup bunun 9 m'si gözenekli ortam içindedir. Kuyudan sabit olarak $Q = 2100$ m³/gün debisi çekilmesi durumunda Şekil 9'da verilen zaman-düşüm değerleri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9 Kuyu zaman-düşüm verileri ve uydurulan tip eğri

Bu da hemen Papadopoulos ve Cooper (1967) tarafından geniş ve sabit çaplı kuyular için geliştirilmiş tip eğrilerin uygulanamayacağını çıkarabiliriz. Çünkü onların eğrileri geç zamanlarda klasik Theis tip eğrilerine kavuşmaktadır. Bu yazıda Şekil 5'de ve yukarıda sunulan değişken çaplı kuyu tip eğrilerinin uygulanabileceği sonucuna varırız. Şekil 5'deki bazı tip eğrilerde gecikmeli iç beslenmeyi gösteren eğrilerde bulunmaktadır.

Değişik sına ma yanılma işlemleri sonrasında eldeki verilere en uygun gelen tip eğri Şekil 9'da gösterildiği üzere $\eta = 3$; $r/L = 0.5$ ve $S_s \approx 10^{-3}$ parametrelerini verir. Geri kalan uygulama aynı klasik tip eğri çalışmalarına benzer ve bunun için önce Şekil 9'da gösterildiği üzere M gibi bir çakışma noktası seçilir. Bu çakışma noktasının tip eğri ve arazi eğrileri üzerindeki koordinatları $W_M(u_{FW}, r/L, \eta) = 10^{-1}$; $1/(u_{FW})_M = 10^3$; $t_M = 2.2$ min; ve $s_M = 1.9 \times 10^{-1}$ m olarak okunur. Bu değerlerin Denklem (13) and (14)'de yerlerine konulması sonucunda çatlaklı akiferin iletim ve depolama katsayıları $T_F = 176$ m²/gün ve $S_F = 4.78 \times 10^{-4}$ olarak bulunur. Önceki kısımda bulunan adım 7'deki bağıntı alüvyon akifer için depolama katsayısını yaklaşık olarak verir ($S_p = 10^{-3}$). Ayrıca $r/L = 0.5$ ve etkin kuyu yarıçapı da 1ç5 m olduğu için $L = 3$ m bulunur.

Yukarıdaki sayısal değerlerin Denklem (30)'da yerine konması ile alüvyum akiferin hidrolitik geçirimsizliği birim metre için

$$\frac{k_p}{m_p} = 19.54$$

bulunur. Doymuş tabaka kalınlığı 9 m ile klasik iletimlik katsayısı tanımından $TP = 19.54 mP^2 = 19.54 \times 9^2 = 1582$ m²/gün hesaplanabilir.

İletgenlik katsayılarının kıyslanması pompalanmayan (alüvyon, gözenekli) akiferin iletimliğinin çatlaklı akifer iletimliğinden 7 – 8 defa daha büyük olduğunu gösterir. Bu da çatlaklı akifere olan düşey beslenmenin hızlı ve bol olduğunu gösterir. Çatlaklı ortamın yegane vazifesi gözenekli ortamdan gelen besleme sularının kuyuya çabucak iletilmesidir.

Sonuçlar

Dördüncü zamana ait kurak bölgelerdeki tortul kayalarda yeraltı suyu birbiri ile irtibatlı olan iki akiferde hareket eder. Bunlardan üst taraftaki akifer gözenekli (alüvyon) alt taraftaki ise çatlaklı akiferdir. Çatlaklı akifer dış etkilerden sıcaklık farkı, güneş ışınımları ve başkalaşım lar sonrasında ortaya çıkmıştır. Gözenekli tabaka ise daha genç ve her zaman üst tarafta su veya rüzgar etkileri ile birikmiş danelerden meydana gelir. Bunlardan çatlaklı ortamda iletimlik yüksek depolama düşük gözenekli ortamda ise iletimlik düşük ama depolama yüksektir. Burada göz önünde tutulan kuyu her iki tabakayı da tam anlamı ile geçirmekte ama gözenekli tabakaya karşı geçirimsiz kuyu cidarı ile sınırlıdır. Kuyunun yarıçapı da aşağıya indikçe artmaktadır. Kuyu ile yeraltı suyunun doğrudan teması çatlaklı yatay tabaka vasıtası ile olmaktadır. Üstteki gözenekli ortam yeraltı suyu ise önce çatlaklı ortamı beslemekte oradan da kuyuya ulaşmaktadır.

Bu tür bir kuyu-akifer konfigürasyonu için geçerli olabilecek analitik yeraltı suyu hareketi denklemleri ve çözümleri bu yazının esas konusunu teşkil eder. Yapılan çalışma ile değişken ve geniş çaplı kuyulara olan yeraltı suyu akımı ile ilgili tip eğri ve doğruların matematik ifadeleri çıkartılmıştır. Çıkartılan bu denklemlerin literatürde daha önceden bulunan basınçlı, sabit geniş çaplı ve sızdırmalı akifer ifadelerini özel durumlar için verdiği gözlenmiştir. Elde edilen tip eğrilerin erken zaman sürelerindeki davranışları pompa debisinin sadece kuyu haznesinde birikmiş sudan gelmesi dolayısı ile doğru şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca her yarı-logaritmik kağıt üzerinde geç zamanlar için işaretlenen düşüm verilerinin her zaman klasik Jacob doğru yöntemi ile değerlendirilemeyeceği gösterilmiştir. Çıkarılan analitik ifadelerin gerek tip doğru ve gerekse tip eğri olarak Suudî Arabistan'dan elde edilmiş ve geniş değişken çaplı kuyu verileri ile uygulanması da gösterilmiştir.

Kaynaklar

- Bai, M., Elsworth, D. and Roegiers J. (1993), Multi-porosity/multi-permeability approach to the simulation of naturally fracture reservoirs, *Water Resour. Res.* 29 (6), 1621-1633.
- Barenblatt, G. I., Zheltov, I. P. and Kochina, I. N (1960) Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fractured rocks (Strata), *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 24 (5), 1286-1303.
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E., (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Amer. Geophys. Union, Trans.*, 27: 526-534.
- De Glee, G.J., (1930). *Over Grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van Putten*, T. Waltman, Jr., Delft.

- Gerke, H. H. and van Genuchten, M. T. (1993) A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media, *Water Resour. Res.* 29 (2), 305-319.
- Hantush, M.S., (1959). Non-steady flow to flowing wells in leaky aquifers. *J. Geophys. Res.*, 64 :1043.
- Kazemi, H., Seth, M. S. and Thomas, G. W. (1969) The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution, *Journal of the Society of Petroleum Engineering* 9, 463-472.
- Odeh, A. S. (1965). Unsteady state behavior of naturally fractured reservoir. *Soc. Pet. Eng. J.*, Vol. 243, 60-64.
- Papadopoulos, I.S., and H.H., Cooper, 1967. Drawdown in a well of large diameter. *Water Resour. Res.*, v.3, pp. 241-244.
- Şen, Z., (1985). Volumetric approach to type curves in leaky aquifers. *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, 111(3): 467-484.
- Şen, Z., (1988). Dimensionless time drawdown plots of late aquifer test data. *Ground Water*, 26(5), 615-618.
- Şen, Z. (1989) Nonlinear flow toward wells, *J. Hydraul. Div., ASCE*, 115(HY2), 193-209.
- Şen, Z. (1990) Non-linear radial flow in confined aquifers toward large diameter wells, *Water Resour. Res.*, 26(5), 1103-1109.
- Şen, Z., 1995. *Applied Hydrogeology For Scientists and Engineers*, CRC Press, Inc., Florida, 444 pages.
- Şen, Z., 2002. Drawdown distribution around large diameter well in double porosity medium. *Jour. Hydrol. Engrg.*, ASCE, Vol. 7, No. 1, pp. 90-96.
- Şen, Z., and Altunkaynak, A. 2004. Variable discharge type curve solutions for confined aquifers. *J. Amer. Wat. Res. Assoc.*, Vol. 40, No. 5, 1189-1198.
- Theis, C.V., 1935. The relationship between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol.16, pp.519-529.
- Warren, J. E. and Root, P. J. (1963) The behaviour of naturally fractured reservoirs, *Society of Petroleum Engineering Journal* 3, 245-255