

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Yeraltı Suyu Hidroliği: Darcy ve Fick'den Bu Yana Geçen Süre İçinde Yapılan Çalışmalara Genel Bakış

Yazışma yazarı:
Vedat BATU
vedatbatu@msn.com

Vedat BATU¹

¹Urs Corporation 100 South Wacker Drive Chicago, Illinois 60606 A.B.D.

Referans:
Batu, V., (2008), Yeraltı Suyu Hidroliği: Darcy ve Fick'ten Bu Yana Geçen Süre İçinde Yapılan Çalışmalara Genel Bakış, Su Kaynakları, 1, 1-13

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

Özet Bu makalede Darcy yasasının yayınlandığı 1856 yılından bu yana geçen süre içinde yeraltı suyu hidroliği konusunda yapılan çalışmalar kronolojik bir sıra içinde gözden geçirilmiştir. Giriş bölümünde bu incelemenin genel bir çerçevesi çizilerek yeraltı sularının korunmasının çevresel korunma ile ilgili etkinliklerin önemli bir ögesi olduğu vurgulanmıştır. İkinci bölümde yeraltı suyu hidroliğinin tarihsel süreç içinde önemli aşamalardan geçerek bugünkü durumuna ulaştığı belirtilmiş ve akiferlerle ilgili hidrolik parametrelerin belirlenmesi ve akiferlerle ilgili matematik modelleme ile ilgili çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde, yeraltı sularının temiz tutulmasına yönelik çalışmaların ancak 1950'li yıllardan sonra başladığı vurgulanmış ve özellikle 1970'li yıllardan sonra stokastik yöntemlerin de yeraltı suyu hidroliğinde önemli araştırma konularından biri olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, hidrodinamik dispersiyon katsayılarının önemli argümanları olan dispersivite değerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların yeterli bir düzeye henüz ulaşmadığı ve bu konudaki araştırmalara devam edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevre, Darcy kanunu, dispersiyon, hidrolik, koruma, model, yeraltı suyu.

Groundwater Hydraulics: General View of studies since Darcy and Fick

Abstract In this paper the groundwater studies since the original work of Darcy in 1856 are presented in a chronological sequence. In the introduction the general framework is drawn and it is emphasized that the groundwater resources protection is a significant element in the environmental protection context. In the second section the historical development of groundwater resources research is exhibited that led to the present day level in addition to studies concerning aquifer parameter determination as well as mathematical models by various researchers. In the third section it is explained that care for clear groundwater resources maintenance has started only after 1950 and it is stated that especially after 1970 the stochastic modeling is one of the research techniques in groundwater studies. On the other hand, it is mentioned that one of the most important arguments as dispersive matters the determination of hydrodynamic dispersion coefficients has not yet reached to a sufficient level and it is necessary to continue researches along this direction.

Keywords: Environment, Darcy law, dispersion, ground water, hydraulics, model. protection.

1. Giriş

Canlıların Dünya'daki yaşamını sürdürebilmesi Dünya'nın doğal kaynaklarına bağlıdır. Dünya'nın, yaşamını sürdürebilmesi açısından temel doğal kaynakları hava, yüzeysel sular, yeraltı suları ve toprak katmanlarından oluşmaktadır. Yapılan araştırmalar, yazının keşfinden bu yana geçen son beş bin yıllık süre içinde, Dünya'nın su kaynaklarından daha iyi yararlanabilme ve suların zararlı etkilerinden korunabilme yönünde çalışmaların yapıldığını göstermektedir. Dünya'nın su kaynakları ile ilgili sayılara bakmak, bu kaynakların sınırsız olmadığını gösterir (Price, 1985): Dünya'daki toplam su hacmi yaklaşık olarak 1400 milyon km³ dür. Bunun % 97 si denizlerdeki sular, % 2.2 kutuplardaki buzullar, ve % 0.6 sı da yeraltı sularından oluşmaktadır. Hacim olarak Dünya'daki yeraltı suları yaklaşık olarak 8 milyon km³ dür.

Bu makalede yeraltı suları ile ilgili özellikle Darcy yasasının yayınlandığı 1856 yılından bu yana geçen süre içinde yapılan bilimsel çalışmalar ve bu çalışmaların pratiğe yansıyan kısımları ele alınacaktır. Darcy yasası yeraltı suyu hidroliğinin matematiksel temelini oluşturması bakımından çok özel bir öneme sahiptir. Yeraltı suyu kirliliğinin matematiksel olarak incelenmesinde, Darcy yasasından ayrı olarak, moleküler difüzyonla ilgili Fick'in birinci yasasının da çok önemli bir yeri vardır. İlginçtir ki, Fick'in birinci yasası da aynı yıllarda (1855) yayınlanmıştır. Fick'in birinci yasası hareket halinde olmayan yüzeysel sulardaki moleküler difüzyonla ilgilidir. Ancak, aynı yasanın yeraltı sularındaki eriyiklerin hareketlerine uygulanabilmesi yirminci yüzyılın ortalarına doğru olmuştur.

Yeraltı suyu terimi genel olarak yeraltı su yüzeyinin altındaki katmanlarla (suya doymun kısımlar) ve yeraltı suyu yüzeyinin (YSY) üstündeki katmanları (suya doymun olmayan kısımlar) kapsamaktadır. YSY'nın altındaki kısımlar "akifer" olarak adlandırılmıştır. Başka bir deyimle, bu terim sadece doymun olan kısımlar içindir. Akifer terimi, iki Latince kelimedenden üretilmiştir. Bu kelimeler "aqua" (su) ve "ferre" (tutan veya taşıyan) dır.

Darcy yasası (Darcy, 1856) başlangıçta tek boyutlu doymun yeraltı suyu akımlarını kapsamaktaydı. Daha sonraki on yıllarda, özellikle 1856 ile 1940 yılları arasında, Darcy yasasının iki ve üç boyutlu akımları da kapsadığı anlaşılmış ve buna bağlı olarak Darcy yasası diferansiyel formlarda yazılmıştır. Bunlardan ayrı olarak, Darcy yasasının Buckingham (1907) tarafından doymun olmayan kısımlar için de geçerli olan genel bir yasa olduğu gösterilmiştir. Aynen Darcy yasasında olduğu gibi, Fick'in birinci yasasının da 1855'i izleyen on yıllarda iki ve üç boyutlu difüzyon halleri için de geçerli olduğu gösterilmiştir. Eriyiklerin hareket halindeki yüzeysel sular ve yeraltı suları içindeki hareketlerinin matematiksel modellemesi için, difüzyon katsayısında yapılan bazı düzenlemelerle, yine Fick'in birinci yasası kullanılmıştır. Bu kullanım 1950'li yıllarda başlamış, bunu izleyen on yıllarda yoğunlaşmış, ve bu kullanım halen de devam etmektedir.

Yeraltı suyu hidroliği, 1856 ile 1935 yılları arasında sadece zamandan bağımsız akımlar için sınırlı kalmıştır. Bu konuda Dupuit (1863) ve Forchheimer ⁽¹⁾ (1901, 1930) tarafından tek ve iki boyutlu yeraltı suyu akımları ve kuyu hidroliği ile ilgili olarak günümüzde de kullanımlarını sürdüren analitik çözümler geliştirilmiştir.

Zamana bağlı yeraltı suyu akımlarının temel matematik modelinin geliştirilmesi 1920 ile 1940 yılları arasında gerçekleşmiştir. İlginçtir ki, bu konudaki çalışmalar yeraltı suyu hidrolikçileri ile zemin mekanikçileri tarafından hemen hemen birbirlerinden habersiz olarak yapılmıştır. Örneğin, Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon modelinin dayandığı zamanı da içeren diferansiyel denklem, aslında zamana bağlı tek boyutlu yeraltı suyu akımı diferansiyel denkleminde başka birşey değildir. Aradaki temel fark, yeraltı suyu hidrolikçilerinin esas değişken olarak hidrolik yükü ve zemin mekanikçilerin ise esas büyüklük olarak basıncı kullanmalarındadır. Bu bağlamda, doymun yeraltı sularının zamana bağlı olarak temel diferansiyel denklemini ve buna bağlı olarak bazı tek boyutlu çözümleri (konsolidasyon teorisi) ilk olarak Terzaghi ⁽²⁾ geliştirmiştir (Terzaghi, 1925). Zamana bağlı kuyularla ilgili ilk analitik çözüm, katılarda ısı iletimi ile ilgili çözümlerden yararlanarak, ilk defa Theis (1935) tarafından yayınlanmıştır. Ancak, Theis bu çözümü elde ederken bu çözüme karşılık gelen ana diferansiyel denkleme hiç değinmemiştir. Akiferlerin elastik yapıya sahip olmasıyla ilgili kavramlar ilk defa Meinzer (1928) tarafından geliştirilmiştir. Akiferlerdeki akımlarla ilgili olarak zaman terimini de içeren diferansiyel denklemle ilgili çalışmalar, Terzaghi'nin yaptığı çalışmalardan ayrı olarak, yeraltı suyu hidroliğinde ilk olarak Jacob (1940, 1946, 1947) tarafından yapılmıştır. Söz konusu zaman terimini de içeren diferansiyel denklem daha sonraki on yıllarda yapılan çalışmalar (Hantush, 1964; Cooper, 1966; Bear, 1979) sonucunda bugünkü şeklini almıştır.

Her ne kadar Darcy yasasının doymun olmayan kısımlarda da geçerli olduğunu göstermek yirminci yüzyılın başlarında gerçekleşti ise de, doymun olmayan kısımlardaki akımların matematiksel olarak incelenmesi ancak 1950 li yıllarda başlamıştır. Bunun temel nedeni, doymun olmayan akımlarla ilgili diferansiyel denklemin yüksek derecede nonlineer olmasıdır. Bu denklemin Gardner (1958) tarafından lineerleştirilmesi önemli bir aşama olmuş ve izleyen on yıllarda doymun olmayan kısımlarla ilgili analitik çözümlerde bir hızlanma görülmüştür ve bu tür çalışmalara halen devam edilmektedir.

(1) Philipp Forchheimer 1890'li yıllarda o zamanki karşılığı olan şimdiki İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Mühendislik Fakültesi Dekanı olarak atanmış ve bu görevini 1910 lu yıllara kadar sürdürmüştür. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'nin Gümüşsuyu'ndaki Hidrolik Laboratuvarı'nda Forchheimer tarafından araştırma yapmakta kullanılan bir kum sandığının olduğuna, bu makalenin yazarı 1970-1974 yılları arasında doktora yaptığı sürede tanık olmuştur.

(2) Karl Terzaghi bu çalışmalarını 1915 ile 1925 yılları arasında İstanbul'da yapmıştır. Kendisinin İstanbul Teknik Üniversitesi'ne gelmesine Philipp Forchheimer önyak olmuştur

Akiferleri simgeleyen parametreler (hidrolik iletkenlik, formasyon kalınlığı vs.) Dünya'nın pekçok akiferinde yatay ve düşey mesafelere bağlı olarak önemli derecede değişiklik göstermektedirler. Bazı parametrelerin zamana bağlı olarak da değiştiği belirlenmiştir. Her ne kadar bu değişiklikleri deterministik numerik modellerle gözönüne almak olanaklı ise de, bu gayretler pek çok araştırmacı tarafından yeterli görülmemiş ve bunun sonucu olarak stokastik yöntemlerin doygun olmayan kısımlara ve akiferlere uygulanması konusunda özellikle 1970'li yıllardan bu yana çalışmalara başlanmıştır. Bu konuda yeraltı suyu akımı ve eriyiklerin hareketi için bazı yaklaşımlar kullanılarak stokastik diferansiyel denklemler geliştirilmiş ve bunlara dayanarak pek çok analitik ve numerik çözümler yayınlanmıştır. Bu diferansiyel denklemlerin geliştirilmesinde seri yaklaşımları kullanılarak ikinci terimin ötesindeki terimler ihmal edilmiştir (Gelhar, 1993; Dagan, 1997; Neuman, 1997). Bu ihmaller konusunda bazı çalışmalar yapıldı ise de, ihmal edilen terimlerin çözümleri ne derece etkilediği henüz açıklığa kavuşturulamamıştır. Yeraltı suyu akımı ve eriyiklerin hareketi ile ilgili parametrelerin belirsizliği yaygın olarak kabul edilmiş ise de, bu belirsizliğin matematiksel olarak nasıl inceleneceği konusunda çeşitli araştırmacılar arasında bugüne kadar henüz bir fikir birliği oluşmamıştır (Neuman, 1997). 1950 li yıllara kadar akifer hidroliği ile ilgili problemler tek akifer yaklaşımına dayanarak elde edilen modellerle çözülmekte idi. Başka bir deyimle, akiferi alttan ve üstten sınırlayan daha az geçirimli katmanların akiferle olan hidrolik bağlantıları ihmal edilmekte idi. Bu hidrolik bağlantıların gözönüne alınarak geliştirilen akifer modelleri ile yapılan tahminler tek akifer modelleriyle yapılanlardan daha fazla gerçeğe yakındır. Bu durumu daha somut bir örnekle açıklamak olanaklıdır. Örneğin, Theis (1935) tarafından geliştirilen kuyu modeli, akiferi alttan ve üstten sınırlayan killi katmanların tamamen geçirimsiz oldukları varsayımına dayanır. Sedimanter akiferlerin bulunduğu yeraltı suyu sistemlerinde, akiferler daha az geçirimli killi katmanlarla sınırlıdır ve bu katmanlar kum ve çakıl gibi malzemeden oluşan akiferlerle hidrolik olarak bağlantılıdır. Killi katmanlar akifer katmanlarından daha fazla sıkışma özelliklerine sahiptirler. Dolayısıyla daha az geçirimi killi katmanlar bu sıkışma sonucunda depoladıkları su kütesinden akifer katmanlarına büyük miktarlarda su iletirler; ve böylece akiferin kapasitesi artmış olur. Bunun sonucu olarak, tek akifer kuramına göre geliştirilen modeller, akiferin kapasitesini gerçek kapasitesinden daha az olarak hesaplama sonucunu doğurur (Neuman ve Witherspoon, 1972).

2. Yeraltı Suyu Hidroliğinin Tarihsel Gelişimi

2.1. Hidrolik Parametrelerin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Herhangi bir akifer projesinde ilk yapılacak iş akiferin jeolojik ve hidrojeolojik yapısının belirlenmesidir ve bu konuda çeşitli laboratuvar ve arazi yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bundan sonraki ilk adım akiferin hidrolik parametrelerinin ölçülmesidir. Bu parametreler, yatay ve düşey hidrolik iletkenlikler, depolama katsayısı (storage coefficient), ve özgül veri (specific yield) gibi temel hidrolik parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametrelerin arazide ölçümlerinde genellikle pompaj deneylerinden yararlanılmaktadır. Ölçülen yeraltı suyu seviyesi (veya yükü) verilerini kuyu hidroliği ile ilgili olarak geliştirilen analitik çözümlerde kullanılarak akiferin hidrolik parametreleri elde edilebilmektedir. Bu amaçla, özellikle yirminci yüzyılın başından bu yana geçen süre içinde pek çok analitik çözüm geliştirilmiştir. Ayrıca, bu çözümlerden yararlanarak, akiferlerde ölçülen yeraltı suyu seviyesi ile ilgili verileri kullanarak çeşitli pratik teknikler sunulmuştur. Aşağıda bunlara değinilecektir.

Daha önce de değinildiği gibi, 1935 yılına kadar kuyularla ilgili olarak geliştirilen çözümler zamandan bağımsız akımlarla (permanan hal) ilgili idi. Sınırlı olmayan akiferlerle (unconfined aquifer) ilk çözüm Dupuit ve Forchheimer tarafından birbirlerinden habersiz olarak geliştirilmiştir (Bear, 1972, 1979). Ve bu denklem yeraltı suyu hidroliği literatüründe Dupuit-Forchheimer kuyu denklemi olarak bilinmektedir. Kuyu hidroliği ile ilgili sınırlı akiferlerde (confined aquifer) ilk analitik çözüm Thiem (1906) tarafından geliştirilmiştir. Bu çözümleri kullanarak akiferlerin hidrolik parametrelerini belirlemeye yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir ve bunlarla ilgili yayınlanmış kitaplar vardır (Kruseman ve de Ridder, 1991; Dawson ve Istok, 1991; Şen, 1995; Batu, 1998).

Kuyu hidroliği ile ilgili zamana bağlı ilk çözüm, daha önce de değinildiği gibi, Theis (1935) tarafından sınırlı akiferler (confined akifer) için yayınlanmış ve buna bağlı olarak özellikle 1935 ile 1950 yılları arasında akifer parametrelerini belirlemeye yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Her ne kadar Theis tarafından yayınlanan çözüm bazı sınırlayıcı varsayımlara dayanmakta ise de, yeraltı suyu hidroliğindeki önemli yerini halen de korumaktadır. Theis'in çözümü aşağıdaki temel varsayımlara dayanır: (1) Akifer homojen ve izotropdur; (2) Akifer yataydır ve kalınlığı sabittir; (3) Kuyudan su çekim debisi sabittir ve kuyu bir çizgisel kaynaktır; (4) Akiferi alttan ve üstten sınırlayan yatay tabakalar geçirimsizdir (confined akifer); ve (5) Kuyu akiferin bütün kalınlığı boyunca etkindir.

Doğadaki akiferler genel olarak daha az geçirimli katmanlar tarafından sınırlanır ve bu katmanlardan esas akifere katkılar olur. Theis çözümünde ihmal edilen bu katkılar (veya sızmalar) Hantush ve Jacob tarafından gözönüne alınarak Theis'in çözümü tadil edilmiştir (Hantush ve Jacob, 1955). Bu çözümde, üstten veya alttan akiferi sınırlayan daha az geçirimli katmanın katkısı göz önüne alınmış; ancak, katmanın depolama özelliği ihmal edilmiştir. Daha sonraki yıllarda, Hantush tarafından katmanın depolama özelliği de göz önüne alınarak Hantush ve Jacob tarafından geliştirilen çözüm geliştirilmiştir (Hantush, 1960). Yukarıda bahsedilen çözümler kuyunun bütün akifer kalınlığı boyunca etkin olduğu varsayımına dayanmıştır. Ancak, 1957 yılında Hantush bir adım daha ileri giderek, kuyunun akifer kalınlığı boyunca kısmen var olması haline dair literatürdeki ilk çözümü geliştirmiştir (Hantush, 1957). Bunu izleyen yıllarda, Hantush bu çözümü akiferin yatay ve düşey hidrolik iletkenliklerini de gözönüne alarak daha da geliştirmiştir (Hantush, 1964). Yukarıda anılan çözümlere dayanılarak akiferlerin hidrolik parametrelerini belirlemeye yönelik özellikle 1950 ile 1970 yılları arasında, başta bu çözümlerin yazarları olmak üzere, çeşitli araştırmacılar tarafından pek çok yöntemler geliştirilmiştir. Bunların tamamına yakınınını 1970 yılından bu yana yayınlanan kitaplarda bulmak olanaklıdır (Kruseman ve de Ridder, 1991; Dawson ve Istok, 1991; Şen, 1995; Batu, 1998).

Dünya akiferlerinin önemli bir kısmı sınırlı olmayan akifer (unconfined aquifer) kapsamına girer. Kuyu hidroliği, bu tür akiferlerde, sınırlı akiferlere göre daha karmaşıktır. Bu konu ile ilgili temel kavramlar ve ilk çözüm kuyunun bütün akifer kalınlığı boyunca etkin olması halinde 1954 yılında Boulton tarafından yayınlanmıştır (Boulton, 1954). Ayrıca, bu çözüme dayanarak akifer parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir (Boulton, 1963). Daha sonraki on yıllarda, Neuman (1972) değişik bir yaklaşımla Boulton'un çözümüne benzer bir çözüm geliştirmiştir. Bunu izleyen yıllarda, Neuman, kuyunun bütün akifer kalınlığı boyunca etkin olmaması halini de içerecek şekilde 1972'de yayınladığı çözümü daha da geliştirmiş (Neuman, 1974) ve buna dayalı olarak akifer parametrelerini belirlemeye yönelik yöntemler geliştirmiştir (Neuman, 1975).

Yukarıda bahsedilen kuyularla ilgili zamana bağlı bütün çözümler kuyunun bir çizgisel kaynak olduğu varsayımına dayanmaktadır. Kuyu çapını da göz önüne alarak sınırlı akiferlerle ilgili zamana bağlı ilk çözüm Papadopulos ve Cooper (1967) tarafından geliştirilmiştir. Kuyunun tüm akifer kalınlığı boyunca etkin olması hali ile ilgili bu çözüm, kuyu içindeki suyun da zamana bağlı olarak gösterdiği seviye değişimlerini de göz önüne almaktadır. Moench (1985), bu çözümü ve Hantush (1960) tarafından geliştirilen çözümü de kapsayacak şekilde kuyularla ilgili daha genel bir çözüm geliştirmiştir. Moench (1988), bu çözümü kuyunun bütün akifer kalınlığı boyunca etkin olmaması halini de içerecek şekilde daha da geliştirmiştir. Daha sonraki yıllarda, Moench (1997), Neuman (1974) tarafından sınırlı olmayan akiferlerde çizgisel kaynak varsayımına dayanarak ve kuyunun bütün akifer kalınlığı boyunca etkin olmaması haliyle ilgili geliştirdiği çözümü, kuyunun çapını da göz önüne alacak şekilde geliştirmiştir. Bu çözüm, aynen Papadopulos ve Cooper (1967) çözümünde olduğu gibi, kuyu içindeki suyun da zamana bağlı olarak gösterdiği seviye değişimlerini de göz önüne almaktadır. Yukarıda bahsedilen çözümlere dayanarak akifer parametrelerini arazi deneylerinden yararlanarak belirlemeye yönelik yöntemler geliştirilmiştir. İlgili makalelerden ayrı olarak, bu yöntemleri, 1970 yılından bu yana yayınlanan bazı kitaplarda bulmak olanaklıdır (Kruseman ve de Ridder, 1991; Dawson ve Istok, 1991; Şen, 1995; Batu, 1998).

Yukarıda bahsedilen yöntemler kuyudan belirli bir debide su çekilmesi prensibine dayanmaktadır. Kuyulardan su çekilmeksizin de akifer parametrelerini ölçmek olanaklı olabilmektedir. İngilizce literatürde "slug test" olarak adlandırılan bu yöntem, kuyuya belirli bir miktarda suyu birden bire dökerek veya kuyudan belirli bir miktarda suyu birden bire çekerek kuyudaki su seviyesini zamana bağlı olarak ölçme prensibine dayanmaktadır. Ölçülen bu değerleri konu ile ilgili matematik modelleri kullanarak akiferin yatay yöndeki hidrolik iletkenliğini belirlemek olanaklıdır. Bu konuda pratikte kullanılan belli başlı matematik yöntemler Hvorslev (1951), Cooper ve diğerleri (1967), Bouwer ve Rice, (1976), Bouwer (1989), ve Hyder ve diğerleri (1994) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemler örneklerle birlikte yayınlanmış bazı kitaplarda da kapsamlı bir şekilde sunulmuştur (1972; Butler, 1997; Batu, 1998).

Yukarıda bahsedilen yöntemler geçirimli ortamlar teorisi esas alınarak geliştirilmiştir. Bu teori, çatlaklı kaya kütlelerindeki sıvı akımlarına (petrol, su, vb. gibi), çatlakların büyüklüğü ve yoğunluğuna bağlı olarak yaklaşık olarak uygulanabilmektedir. Ancak, çatlaklı ortamlar teorisi esas alınarak geliştirilen matematik yöntemler ve ölçüm metodları doğadaki gerçek olgulara daha yakındır. Çatlaklı ortamlardaki akımların pratikteki önemi petrol mühendisliği uygulamaları ile ortaya çıkmış ve bu konudaki ilk önemli yayın eski Sovyetler Birliği araştırmacıları tarafından 1960 yılında yapılmıştır (Barenblatt ve diğerleri, 1960) ve daha sonraki yıllarda bu konu daha da geliştirilmiştir (Warren ve Root, 1963).

Bu yöntemlerin çatlakların bulunduğu kayalardan oluşan akiferlerle ilgili kapsamlı uygulamaları ve bilgisayar programları ilk olarak Moench (1984, 1988) tarafından geliştirilmiş ve bu yöntemler halen yeraltı suyu hidroliği ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Şu noktaları önemle belirtmekte yarar vardır: Çatlaklı ortamların hidroliği geçirimli ortamlar hidroliğine göre çok daha karmaşıktır. Şu ana kadar bu konuda bilimsel olarak önemli katkılar olmuştur. Ancak bunların geçirimli ortamlar teorisine göre yapılan çalışmalarla aynı paralellikte olduğunu söylemek olanaklı değildir ve bu konunun daha da işlenmesi gerekmektedir.

Doymun olmayan bölgede (yeraltı suyu yüzeyi ile zemin yüzeyi arasındaki kısım) de Darcy yasası geçerlidir ve hidrolik iletkenlik su içeriğine bağlıdır (Buckingham, 1907). Bu konu ile ilgili matematik yöntemler ve bunlara bağlı olarak geliştirilen ölçüm yöntemleri esas itibariyle tarım mühendisliğine yöneliktir ve bunlarla ilgili çalışmalar Soil Science, Soil Science Society of American Journal, Water Resources Research, ve Vadose Zone Journal adlı dergilerde yayınlanmaktadır.

2.2. Matematik Modellemeyle İlgili Çalışmalar

Yukarıda da belirtildiği gibi, yirminci yüzyılın ortalarına kadar yeraltı suyu hidroliği ile ilgili matematik yöntemler genel olarak analitik yöntemlerle sınırlı olmuştur. Numerik yöntemlerin kullanılması bilgisayarların gelişimine paralel olarak 1960'lı yıllardan sonra başlamıştır. Bu konudaki analitik ve numerik yöntemlerin kullanılmasıyla yapılan çalışmalara aşağıda değinilecektir.

İlgili literatürün incelenmesinden görüleceği gibi, 1960'lı yıllara kadar doymun yeraltı suyu hidroliği teorisine dayanarak çok sayıda analitik çözüm geliştirilmiştir. Bu çözümler esas itibariyle drenaj hidroliği, akım ağları, barajlar, kanallar, ve benzeri hidrolik yapımlarla ilgili olmuştur. Bu konularla ilgili pekçok çözümü, ilgili makalelerden ayrı olarak, 1930'lu yıllardan bu yana yayınlanmış bazı kitaplarda da bulmak olanaklıdır (Muskat, 1937; Polubarinova-Kochina, 1962; Bear, 1972; Bear, 1979).

Yeraltı suyu hidroliğinde analog modelleme yöntemleri de geçen yüzyıl içinde özellikle zamandan bağımsız akımlar için kullanılmıştır. Bunlar arasında önemli bir yeri olan ve Hele-Shaw tarafından geliştirilen viskoz akım analogisi (Hele-Shaw, 1897, 1898) doymun yeraltı suyu diferansiyel denklemi ile birbirine çok yakın iki düzlem arasındaki viskoz sıvının akımı ile ilgili diferansiyel denklemin benzerliklerine dayanır. Ayrıca, Darcy yasası ile Ohm yasası arasındaki benzerlikten yararlanarak elektrik analog modelleme yöntemleri geliştirilmiştir (Bear, 1972). Ancak bu analog yöntemlerin kullanımı, hızlı bilgisayarlar ve numerik yöntemlerin gelişmeye başladığı 1970'li yıllardan sonra giderek azalmış ve günümüzde kullanım alanları yok denecek kadar az bir düzeye inmiştir.

Analitik çözümler genel olarak bazı basitleştirilmiş varsayımlara dayanmaktadır (Sonsuz ortam varsayımı, hidrolik iletkenliğin bütün ortamda sabit olması varsayımı, başlangıç ve sınır koşulları ile ilgili varsayımlar gibi). Numerik yöntemlerde bu tür sınırlamaların olmayışı karmaşık akifer problemlerinin çözümünü olanaklı hale getirmiştir. Bu konudaki araştırmalar 1960'lı yıllarda başlamış ve bu güne kadar bu konuda önemli gelişmeler olmuştur. Akiferlerle ilgili sonlu farklar yöntemine dayanarak ilk iki boyutlu akım modeli 1970'li yılların başında pratikte kullanılmaya başlanmıştır (Prickett ve Lonquist, 1971). Daha sonraki on yıllarda sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayanarak pratikte kullanma amacıyla iki ve üç boyutlu numerik modeller geliştirilmiştir. Bunların içinde pratikte en fazla kullanıma sahip olanı MODFLOW (McDonald ve Harbaugh, 1984) adındaki programdır. Üç boyutlu sonlu farklar yöntemine dayanarak FORTRAN dilinde yazılan MODFLOW bilgisayar programı ile akiferlerle ilgili çeşitli karmaşık durumları modellemek olanaklı olmuştur. MODFLOW programını kullanarak çeşitli katmanlardaki hidrolik yük dağılımını zamana ve yere bağlı olarak belirlemek olanaklıdır. MODFLOW programının dayandığı temel prensipleri ve pratikteki uygulama alanlarını kapsamlı bir şekilde anlatan son yıllarda yazılmış bazı kitaplarda (Anderson and Woessner, 1992; Batu, 2006) bulmak olanaklıdır. MODFLOW programına dayanarak yeraltı suyundaki eriyik parçacıklarının izledikleri yolları belirlemeye yönelik sadece konveksiyon etkilerini gözönüne alarak MODPATH (Pollock, 1989) adında bir program geliştirilmiştir. Bundan ayrı olarak, son yirmi yıl içinde MODFLOW programına dayanarak yeraltı suyu kirliliği konularında kullanılmak amacıyla ilave programlar geliştirilmiştir. Bunlara daha sonra değinilecektir.

Yukarıda bahsedilen yaklaşımların hepsi deterministik yöntemlere dayanır. Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, stokastik yöntemlerin yeraltı suyu hidroliğine uygulanması 1970'li yıllarda başlamış ve bu yöndeki çalışmalar halen devam etmektedir. Ancak stokastik yöntemlerin kullanımı pratik uygulamalarda henüz yaygınlık kazanmamıştır.

Akiferlerle ilgili matematik modellemedeki gelişmelere paralel olarak, doygun olmayan kısımlardaki akımlarla ilgili akımlar için matematik modellemede de 1950'li yıllardan bu yana önemli gelişmeler olmuştur. Doygun olmayan akımlarla ilgili Richards denklemi olarak adlandırılan diferansiyel denklem (Richards, 1931) yüksek derecede nonlineerdir ve bu denklemin tek boyutlu hali ile ilgili ilk yarı analitik çözüm Philip tarafından 1950'li yıllarda yayınlanmıştır (Philip, 1957). Daha sonraları, 1970'li yıllarda Richards denklemi sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak numerik olarak çözülmüştür. Bunlara paralel olarak, doygun olmayan kısımlarla ilgili analitik çözümlerin geliştirilmesi yönünde önemli gelişmeler olmuştur. Giriş bölümünde de değinildiği gibi, ana diferansiyel denklemin Gardner (1958) tarafından lineerleştirilmesi bu gelişmelerin temel nedenidir. Bu diferansiyel denkleme dayanarak, nokta, çizgi, şerit, ve disk şeklindeki kaynaklarla ilgili pek çok sayıda çözüm geliştirilmiştir (Philip, 1969; Raats, 1970; Warrick, 1974, 1975; Warrick ve Lomen 1976; Batu, 1978; Batu ve Gardner, 1978; Batu, 1982; Batu, 1983b). Doygun olmayan akımlarla ilgili akım çizgilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar 1970'li yıllarda başlamıştır. Bu konu ile ilgili olarak Raats (1970) ilk olarak akım çizgilerinin belirlenmesine temel olan diferansiyel denklemi çıkartmış ve çizgisel ve dairesel kaynaklarla ilgili analitik çözümler geliştirmiştir. Bunu izleyen yıllarda doygun olmayan kısımlardaki şerit kaynaklardan akım haliyle ilgili analitik çözümler geliştirilmiş ve bunlarla ilgili pratik uygulamalar yapılmıştır (Batu ve Gardner, 1978; Batu, 1979, 1980; Philip, 1984).

3. Yeraltı Sularının Temiz Tutulmasına Yönelik Çalışmaların Tarihsel Gelişimi

3.1. Akiferlerin Kirlenmesine Genel Bakış

Dünya'nın yeraltı suyu kaynaklarının kalitesi, doğal kaynakların kullanımının nüfus artışına paralel olarak artması ve sanayileşmenin giderek yaygınlaşması sonucunda azalmaktadır. Yeraltı sularının kirlenmesinin önemi gelişmiş ülkelerde bile ancak 1960'lı yıllardan sonra anlaşılabilmiştir. Bunun en önemli kanıtlarından biri, Amerika Birleşik Devletleri'nde bile Çevre Koruma Kurumu'nun ancak 1972 yılında kurulabilmesidir. Bunu izleyen yıllarda diğer bazı gelişmiş ülkelerde ve hatta gelişmekte olan bazı ülkelerde de benzer kurumların oluşturulması yönünde adımlar atıldığı görülmüştür. Eğer bu kurumlar endüstri devriminin olduğu yıllarda (Ondokuzuncu yüzyılın ortalarında) kurulmuş olsaydı, Dünya'nın yeraltı suyu kaynaklarının daha temiz ve daha kullanışlı olacağı tartışma götürmez bir gerçektir.

Yirminci yüzyılın ortalarına kadar akiferlerle ilgili akademik ve uygulamaya yönelik çalışmalar genellikle, kaliteye bakmaksızın, akiferlerin bünyelerinde bulundurduğu suyun etkin bir şekilde kullanılmasına yöneliktir. Ancak, özellikle 1960'lı yıllardan sonra, akiferlerle ilgili çalışmalara kirlenen akiferlerin temizlenmesi ve temiz olan akiferlerin kirlilikten korunmasına yönelik çalışmalar da eklenmiştir. Bu çalışmalar 1960'lı yılları izleyen on yıllarda giderek yoğunlaşmıştır. Akiferlerin kirlenmesi diğer doğal kaynaklara (hava ve yüzeysel sular) göre çok daha yavaştır. Örneğin, tipik bir nehirde suyun hızı 1 m/saniye'dir. Akiferlerde ise, 1 m/gün yüksek bir hızdır. Bazı akiferlerde suyun hızı 1 m/yıldan daha düşüktür. Bu sayısal değerler kirlenen akiferlerin temizlenmesinin yüzeysel sulara göre daha zor ve daha pahalı olacağını açıkça göstermektedir.

Kirli akiferlerin temizlenmesi ve temiz akiferlerin korunması yönündeki çalışmalarda son çeyrek yüzyıldan bu yana bilgisayar kullanımına dayanan matematiksel modeller etkin olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım bilgisayarların gelişimine paralel olarak hızla artmakta ve gelişmektedir. Aşağıda, kirli eriyiklerin akifer katmanlarındaki hareketleriyle ilgili olarak Fick'den bu yana yapılan çalışmalara değinilecektir.

3.2. Eriyiklerin Matematik Modellemesine Yönelik Çalışmalar

Başlangıçta da belirtildiği gibi, yeraltı suyu kirliliği ile ilgili matematiksel modelleme ile ilgili çalışmalar Fick'in moleküler difüzyonla ilgili birinci yasasına dayanmaktadır (örneğin, Batu, 2006, sayfa 130). Akiferlerdeki akımlarda hidrolik iletkenliğin noktadan noktaya değişiminin sonucu olarak akımın hızı da değişmekte ve durum bilimsel literatürde dispersiyon olarak adlandırılan duruma neden olmaktadır. Fick'in birinci yasasının dispersiyon etkilerini içermemesinden ötürü ilave çalışmaların yapılması gerekli olmuştur. Bu çalışmalar 1960'lı yılların başında olmuş ve dispersiyon tansörü ile ilgili denklemler geliştirilmiştir (Bear, 1961; Scheidegger, 1961) (örneğin, Batu, 2006, sayfa 17-18). Bu çalışmalarda difüzyon katsayısı yerine hidrodinamik dispersiyon katsayısı kullanılmıştır. Dolayısıyla, dispersiyon katsayısı moleküler difüzyonla mekanik dispersiyonun etkilerini içermektedir. Bu denklemlerde, üç boyutlu mekanik dispersiyonun etkisi literatürde dispersiviterler (boyutları L) olarak adlandırılan üç büyüklükle temsil edilmiştir (Batu,

2006, sayfa 45-48). Yine 1960'lı yıllarda, bir ve iki boyutlu analitik matematik modellerden yararlanarak dispersiviteelerin deneysel olarak belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır (Rumer, 1962; Harleman ve Rumer, 1963). Bazı eriyikler (klor ve brom gibi) akifer boşluklarında suyun akımına eşit hızla hareket ederler. Bunun nedeni, bu eriyiklerin, akiferi oluşturan tanelere kimyevî reaksiyonlar sonucu yapışmamasıdır. Bu tür eriyikler için gecikme katsayısı bire eşittir. Kirletici eriyiklerin pek çoğunda ise bu durumun tersi olmaktadır. Başka bir deyimle, eriyiğin bir kısmı kimyevî reaksiyonlar sonucunda akifer tanelerine yapışmakta ve eriyik parçacıkları boşluklardaki su hızından daha küçük hızla hareket etmektedir. Böyle durumlarda gecikme katsayısı birden büyük olmaktadır (Batu, 2006, sayfa 22-26). Bunlardan ayrı olarak, kirletici eriyiklerin bazıları, radyoaktif maddeler de dahil, akiferdeki hareketleri sırasında bozulmaya maruz kalarak başka bileşenlere dönüşmektedir (degradation). Yukarıda bahsedilen bütün etkileri gözönüne alarak geçirimli ortamlardaki eriyik hareketini ifade eden ana diferansiyel denklem 1960'lı yılların sonunda bugünkü kullanılan şeklini almıştır (Batu, 2006, sayfa 32-35). Bu denklem, geçirimli ortamlarla ilgili literatürde hidrodinamik dispersiyon diferansiyel denklemi olarak anılmaktadır.

Hidrodinamik dispersiyon diferansiyel denkleminin bir boyutlu hali için sabit kaynak konsantrasyonu (Dirichlet koşulu) ve akım hızının sabit olması halinde ilk çözüm 1940'lı yılların sonu ile 1950'li yılların başlarında değişik araştırmacılar tarafından birbirlerinden habersiz olarak yayınlanmıştır (Glueckauf ve diğerleri, 1949; Gröbner ve Hofreiter, 1949, 1950; Lapidus ve Amundsen, 1952). Daha sonraları, aynı çözüm Ogata ve Banks (1961) tarafından yukarıda bahsedilen çalışmalardan habersiz olarak yayınlanmıştır. Aynı çözüm, dikdörtgen şeklinde bir kaynakla ilgili üç boyutlu olarak elde edilen genel bir matematik modelin bir boyutlu haldeki özel çözümü olarak elde edilmiştir (Batu, 1996). Bir boyutlu hidrodinamik dispersiyonla ilgili analitik çözümün akifer hidroliğinde önemli bir yeri vardır ve oldukça yaygın pratik uygulama alanı vardır. Özellikle 1960'lı yıllardan bu yana geçen süre içinde bu tür analitik çözümlerde önemli gelişmeler olmuş ve iki ve üç boyutlu haller için pratikte kullanılma amacıyla pek çok çözüm yayınlanmıştır (Bruch ve Street, 1967; Shen, 1976; Cleary ve Unga, 1978; Batu, 1983a; Batu, 1989; Batu, 1996).

Akifer tipindeki kaynak koşulu halinde (Cauchy koşulu) bir boyutlu hal ile ilgili ilk çözüm Lindstrom ve diğerleri (1967) tarafından geliştirilmiştir. Bu konuda iki ve üç boyutlu hallerle ilgili ilk çözümler Batu ve van Genuchten (1990), Batu (1993, 2006) tarafından geliştirilmiştir. Bir, iki ve üç boyutlu değişik kaynak koşullarına dayalı analitik çözümleri bu konuda yazılmış bazı kitaplarda da bulmak olanaklıdır (Bear, 1972; Bear, 1979; van Genuchten and Alves, 1982; Batu, 2006).

Daha önce de değinildiği gibi, analitik çözümler yeraltı suyu hızının sabit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu sınırlayıcı özelliğe karşın, analitik çözümlerin pratik uygulamalarda çok önemli bir yeri vardır. Ancak akiferlerin hidrolik parametrelerinin değişkenliği, akiferlerden kuyular ve benzer yollarla su çekilmesi veya su ilave edilmesi, ve bunlara benzer daha başka durumlarda akiferlerdeki hızları tek bir hızla simgelemek olanaklı değildir. Böyle durumlar için sonlu farklar, sonlu elemanlar, ve benzer nümerik yöntemlere dayanarak geliştirilen bilgisayar programlarından yararlanılmaktadır. Son yirmi yıl içinde MODFLOW bilgisayar programına dayanarak geliştirilen MT3D (Zheng, 1990) ve MODFLOWT (Duffield, 1996) adlı bilgisayar programları halen pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır.

Daha önce de değinildiği gibi, eriyik parçacıklarının izledikleri yolları belirlemeye yönelik sadece konveksiyon etkilerini gözönüne alarak matematik modeller ve bunlara bağlı olarak bilgisayar programları geliştirilmiştir. Başka bir deyimle, bu modellerde dispersiyonun etkileri ihmal edilmiştir. Konveksiyon ve dispersiyon etkilerini bir arada göz önüne alarak hidrodinamik dispersiyon akım fonksiyonu kavramının yeraltı suyu hidroliğinde geliştirilmesi sadece akımlar için kullanılan akım fonksiyonu kavramına göre oldukça yenidir. Bu yöntem 1980'li yılların sonuna doğru yazarın çalışmaları sonucunda ilk defa olarak yeraltı suyu hidroliği literatürüne girmiştir (Batu, 1987; Batu, 1988). Bu yöntemle ilgili ana diferansiyel denklemler akım hızının değişken olduğunu gözönüne alarak çıkartılmış ve yöntemin uygulamaları, sabit hız varsayımıyla analitik çözümlere dayalı örneklerle gösterilmiştir (Batu, 2006). Bu çalışmaların bu konuda sadece bir giriş olduğunu ve bu konuda daha çok yapılacakların olduğunu özellikle belirtmekte yarar vardır.

Her ne kadar son yarım yüzyıl içinde hidrodinamik dispersiyon teorisi ve bunun pratik uygulamaları ile ilgili önemli gelişmeler oldu ise de, dispersivite değerlerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmaların henüz yeterli bir düzeye ulaşmadığını ve bu konuda daha ileri düzeyde çalışmaların yapılması gerektiğini söylemek olanaklıdır. Özellikle 1980'li yıllardan bu yana geçen süre içinde deterministik ve stokastik yöntemleri kullanarak pek çok kuramsal deneylere ve arazi deneylerine dayanan çalışmalar yapılmıştır. Bu

çalışmalar, laboratuvar deneylerine dayanarak elde edilen dispersiyon katsayıları ile ilgili değerlerin akiferlerdeki eriyik hareketinin matematik modellenmesinde yeterli olmamasından kaynaklanmıştır. Giriş bölümünde de değinildiği gibi, dispersivite belirlenmesine yönelik stokastik yöntemlere dayanarak yapılan kuramsal çalışmalar konusunda çeşitli araştırmacılar arasında stokastik yöntemlerin uygunluğu konusunda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Stokastik yöntemlerle ilgili üç temel analiz yönteminden yararlanılmaktadır (Freeze ve diğerleri, 1990). Bu çalışmaların temel başlıkları şunlardır: (1) Birinci derece (first-order) analizi; (2) Perturbasyon analizi; ve (3) Monte-Carlo analizi. Birinci derece analizi (örneğin, Dagan, 1989) basit olarak belirsizliğin doğrudan doğruya hedef alınma prensibine dayanır. Stokastik diferansiyel denklemleri bu yaklaşımla hem analitik ve hem de numerik yöntemlerle çözmek olanaklıdır. Ancak bu yöntemin kullanımı lineer veya lineere yakın sistemlerle sınırlıdır. Bunlardan ayrı olarak; bu yaklaşım için girdi parametrelerinin sadece ilk iki momentinin (ortalama ve varyans) belirlenmesi gerekir. Bunlara bağımlı olarak çıktılarının da ilk iki momenti belirlenir. Perturbasyon yaklaşımında (Gelhar, 1993) girdi ve çıktı değişkenleri, bir ortalama ve bu ortalama olan sapmaların (perturbasyon) tanımlanmasına dayanır. Bu yaklaşım temel olarak Fourier-Stieltjes integralleri (Lumley ve Panofsky, 1964) ve invers Fourier transformunun kullanımı ile spectral analize dayanır. Bu yaklaşım sonsuz ortamlarda analitik çözümlerin geliştirilmesi için çok uygundur. Ancak, bu yaklaşımlar girdi parametrelerinin varyanslarının küçük olmaları hallerinde iyi sonuçlar verir. Monte-Carlo yaklaşımı olarak anılan üçüncü yaklaşım stokastik diferansiyel denklemlere dayanmaz; deterministik yöntemlerin kullanılmasıyla geniş kapsamlı numerik deneylerin yapılması ve bunların sonuçlarının istatistik yöntemlerle analizi prensibine dayanır. Bu konulara son zamanlarda yayınlanmış bazı kitaplarda kapsamlı olarak değinilmiştir (Dagan, 1989; Gelhar, 1993; Batu, 2006).

4. Sonuçlar

Yeraltı suyu hidroliği ile ilgili bilimsel çalışmalar Darcy yasasının yayınlandığı 1856 yılında başlamış ve geçen son 150 yıllık süre içinde önemli gelişmeler olmuştur. Bu gelişmelerin sonucunda yeraltı suyu mühendisliği ve hidrojeoloji gibi adlarla anılan pratik uygulama alanları doğmuştur. Bu alanların önemi çevreyi korumaya yönelik çalışmaların 1970'li yıllardan sonra ortaya çıkmasıyla daha da artmıştır. Son 150 yıl içinde yeraltı suyu hidroliği ile ilgili çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- (1) Yeraltı suyu hidroliği ile ilgili çalışmalar 1930'lu yıllara kadar sadece zamandan bağımsız haller için sınırlı idi,
- (2) Akımların zamana bağımlı olarak incelenmesi 1930 yıllarda tek akifer halleri için başladı,
- (3) Akifer problemlerinin birden fazla akiferi içerecek şekilde bir arada incelenmesi 1950'li yıllarda başlamış ve bunu izleyen onyıllarda daha da gelişmiştir,
- (4) Her ne kadar Fick yasasının 150 yıllık bir geçmişi var ise de, bu yasanın akiferlere uygulanması ancak 1950'li yıllardan sonra olmuştur,
- (5) Akiferlerle ilgili numerik modellerin geliştirilip pratik uygulamalarda kullanılması bilgisayarların gelişimine paralel olarak 1970'li yıllardan sonra olmuştur,
- (6) Hidrodinamik dispersiyon konusunda 1960'lı yıllardan bu yana deterministik ve stokastik yöntemlerin kullanılması ile önemli bilimsel gelişmeler olmuş; ancak, dispersivite değerlerinin belirlenmesi yönündeki çalışmalar henüz yeterli bir düzeye ulaşmamıştır, ve
- (7) Stokastik yöntemlerin seçimi ve uygulanmaları konusunda çeşitli araştırmacılar arasında henüz tam bir fikir birliği oluşmamıştır.

5. Kaynaklar

- Barenblatt, G.I., Yu. P. Zheltov, and I.N. Kochina, "Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks (Strata)," J. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., Vol. 24, pp. 1286-1303, 1960.
- Batu, V., "Steady Infiltration From Single and Periodic Strip Sources," Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, pp. 544-549, 1978.
- Batu, V., "Flow Net for Unsaturated Infiltration From Strip Source," Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. IR3, Proc. Paper 14822, pp. 233-245, 1979.
- Batu, V., "Flow Net for Unsaturated Infiltration From Periodic Strip Sources," Water Resources Research, Vol. 16, No. 2, pp. 284-288, 1980.

- Batu, V., "Time-Dependent, Linearized Two-Dimensional Infiltration and Evaporation From Nonuniform and Nonperiodic Strip Sources," *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1725-1733, 1982.
- Batu, V., "Two-Dimensional Dispersion from Strip Sources," *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 109, pp. 827-841, 1983a.
- Batu, V., "Time Dependent Linearized Two-Dimensional Infiltration and Evaporation From Nonuniform and Periodic Strip Sources," *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 6, pp. 1523-1529, 1983b.
- Batu, V., "Introduction of the Stream Function Concept to the Analysis of Hydrodynamic Dispersion in Porous Media," *Water Resources Research*, Vol. 23, pp. 1175-1184, 1987.
- Batu, V., "Contaminant Plume Analysis Using the Hydrodynamic Dispersion Stream Function (HDSF) Concept," *Ground Water*, Vol. 26, pp. 71-77, 1988.
- Batu, V., "A Generalized Two-Dimensional Analytical Solution for Hydrodynamic Dispersion in Bounded Media," *Water Resources Research*, Vol. 25, pp. 1125-1132, 1989.
- Batu, V., "A Generalized Two-Dimensional Analytical Solute Transport Model in Bounded Media for Flux-Type Finite Multiple Sources," *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 2881-2892, 1993.
- Batu, V., "A Generalized Three-Dimensional Analytical Solute Transport Model for Multiple Rectangular First-Type Sources," *Journal of Hydrology*, Vol. 174, pp. 57-82, 1996.
- Batu, V., *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 727 pp., 1998.
- Batu, V., *Applied Flow and Solute Transport Modeling in Aquifers: Fundamental Principles and Analytical and Numerical Methods*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 667 pp., 2006.
- Batu, V., and W.R. Gardner, "Steady-State Solute Convection in Two Dimensions With Nonuniform Infiltration," *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 18-22, 1978.
- Batu, V., and M.T. van Genuchten, "First- and Third-Type Boundary Conditions in Two-Dimensional Solute Transport Modeling," *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 339-350, 1990.
- Bear, J., "On the Tensor Form of Dispersion in Porous Media," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, pp. 1185-1197, 1961.
- Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier, New York, 764 pp., 1972.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, U.S.A., 569 pp., 1979.
- Boulton, N.S., "Unsteady Radial Flow to a Pumped Well Allowing Delayed Yield from Storage", *International Association of Scientific Hydrology*, Vol. II, pp. 472-477, 1954.
- Boulton, N.S., "Analysis of Data from Non-equilibrium Pumping Tests Allowing for Delayed Yield from Storage", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, The United Kingdom, Vol. 26, pp. 469-482, 1963.
- Bouwer, H., "The Bouwer and Rice Slug Test – An Update," *Ground Water*, Vol. 27, No. 3, pp. 304-309, 1989.
- Bouwer, H., and R.C. Rice, "A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating Wells," *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 423-438, 1976.
- Bruch, J.C., and R.L. Street, "Two-Dimensional Dispersion," *Journal of Sanitary Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 93, pp. 17-39, 1967.
- Buckingham, E., "Studies on the Movement of Soil Moisture," *Bulletin 68*, 61 pp., U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1907, U.S.A.
- Butler, J.J., Jr., *The Design, Performance and Analysis of Slug Tests*, Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, 252 pp., 1997.
- Cleary, R.W., and M.J. Unger, "Analytical Methods for Ground Water Pollution and Hydrology," *Water Resources Program, Report 78-WR-15*, Princeton University, Princeton, New Jersey, 1978.
- Cooper, H.H., Jr., "The Equation of Groundwater Flow in Fixed and Deforming Coordinates," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 71, pp. 4785-4790, 1966.
- Cooper, H.H., Jr., J.D. Bredehoeft, and I.S. Papadopoulos, "Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water," *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 263-269, 1967.
- Dagan, G., *Flow and Transport in Porous Formation*, Springer, Berlin, Germany, 465 pp., 1989.
- Dagan, G., "Stochastic Modeling of Flow and Transport: The Broad Perspective," in *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, G. Dagan and S.P. Neuman Editors, *International Hydrology Series*, Cambridge University Press, Cambridge, The United Kingdom, pp. 3-19, 1997.

- Darcy, H., "Les Fontaines Publiques de la Ville Dijon," Dalmont, Paris, France, 1856.
- Dawson, K.J., and J.D. Istok, *Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 344 pp., 1991.
- Duffield, G.M., "MODFLOWT: A Modular Three-Dimensional Ground Water Flow and Transport Model," Version 1.1, Hydrosolve, Inc., and GeoTrans, Inc., Sterling, Virginia, 1996.
- Dupuit, J., *Etudes Théoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Découverts et à Travers les Terrains Perméables*, Second edition, Dunod, Paris, France, 304 pp., 1863.
- Forchheimer, P., *Wasserbewegung durch Boden*, Z. Ver. Deutsch., Ing 45, 1982-1788, 1901.
- Forchheimer, P., *Hydraulik*, third edition, Teubner, Leipzig, Berlin, Germany, 1930.
- Freeze, R.A., J. Massmann, L. Smith, T. Sperling, and B. James, "Hydrogeological Decision Analysis: 1. Framework," *Ground Water*, VI. 28, pp. 738-766, 1990.
- Gardner, W.R., "Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to evaporation from a Water Table," *Soil Science*, Vol. 85, No. 4, pp. 228-232, 1958.
- Gelhar, L.W., *Stochastic Subsurface Hydrology*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 390 sayfa, 1993.
- Glueckauf, E., K.H. Barker, and G.P. Kitt, "Theory of Chromatography, 8: The Separation of Lithium Isotopes by Ion Exchange and of Neon Isotopes by Low-Temperature Adsorption Columns," *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 7, pp. 199-213, 1949.
- Gröbner, W., and N. Hofreiter, *Integraltafel*, Springer, Vienna, Vol. 1, 1949, Vol. 2, 1950.
- Hantush, M.S., "Non-steady Flow to a Well Partially Penetrating an Infinite Leaky Aquifer", *Proceedings, Iraqi Scientific Society*, Vol. 1, pp. 1-19, Baghdad, Iraq, 1957.
- Hantush, M.S., "Modification of the Theory of Leaky Aquifers", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65, No. 11, pp. 3713-3725, 1960.
- Hantush, M.S., "Hydraulics of Wells," *Advances in Hydrosience*, edited by Ven Te Chow, academic Press, New York, pp. 281-442, 1964.
- Hantush, M.S., and C.E. Jacob, "Non-Steady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquifer", *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 36, No. 1, pp. 95-100, 1955.
- Harleman, D.R.F., and R.R. Rumer, "Longitudinal and Lateral Dispersion in an Anisotropic Medium," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 16, pp. 385-394, 1963.
- Hele-Shaw, H.S., "Experiments on the Nature of Surface Resistance in Pipes and on Ships," *Trans. Inst. Naval Architects*, Vol. 39, pp. 145-156, 1897.
- Hele-Shaw, H.S., "Experiments on the Nature of Surface Resistance of Water and Streamline Motion Under Certain Experimental Conditions," *Trans. Inst. Naval Architects*, Vol. 40, pp. 21-46, 1898.
- Jacob, C.E., "Flow of water in Elastic Artesian Aquifer," *EOS Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 21, pp. 574-586, 1940.
- Jacob, C.E., "Radial Flow in a Leaky Artesian Aquifer," *EOS Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 27, pp. 198-208, 1946.
- Jacob, C.E., "Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well," *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 112, pp. 1047-164, 1947.
- Kruseman, G.P., and N.A. De Ridder, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, Second Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, Publication 47, 377 pp., 1991.
- Lapidus, L., and N.R. Amundsen, "Mathematics of Adsorption in Beds: IV. The Effect of Longitudinal Diffusion in Ion Exchange Chromatographic Columns," *J. Phys. Chem.*, Vol. 56, pp. 984-988, 1952.
- Lindstrom, F.T., R. Haque, V.H. Freed, and L. Boersma, "Theory on the Movement of Some Herbicides in Soils: Linear Diffusion and Convection of Chemicals in Soils," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 561-565, 1967.
- Lumley, J.L., and H.A. Panofsky, *The Structure of Atmospheric Turbulence*, Interscience, New Yor, 239 pp., 1964.
- McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh, "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model," Open File Report 83-875, U.S. Geological Survey, National Center, Reston, Virginia, 528 pp., 1984.
- Moench. A.F., "Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir With Fracture Skin," *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 831-846, July, 1984.
- Moench, A.F., "Transient Flow to a Large-Diameter well in an Aquifer With Storativity Semiconfining Layers," *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1121-1131, August, 1985.
- Moench, A.F., "Flow to a Well of Finite Diameter in a Homogeneous Anisotropic Water Table Aquifer," *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 1397-1407, June 1997.

- Moench, A.F., "The Response of Partially Penetrating Wells to Pumpage From Double-Porosity Aquifers," Symposium Proceedings of International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks, Georgia State University, pp. 208-219, May 15-18, 1988.
- Muskat, M., *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, McGraw-Hill, New York, 1937; 2nd printing by Edwards, Ann Arbor, Michigan, 1946.
- Neuman, S.P., "Stochastic Approach to Subsurface Flow and Transport: A View to the Future," in *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, G. Dagan and S.P. Neuman, Editors, International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge, The United Kingdom, pp. 231-241, 1997.
- Neuman, S.P., and P.A. Witherspoon, "Field Determination of the Hydraulic Properties of Leaky Multiple Aquifer Systems," *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 5, pp. 1284-1298, 1972.
- Papadopoulos, I.S., and H.H. Cooper, Jr., "Drawdown in a Well of Large Diameter," *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 241-44, First Quarter, 1967.
- Philip, J.R., "The Theory of Infiltration 1. The Infiltration Equation and Its Solution," *Soil Science*, Vol. 83, pp. 345-357, 1957.
- Philip, J.R., "Theory of Infiltration," In Ven Te Chow, Editor, *Advances in Hydroscience*, New York, Vol. 5, pp. 215-296, 1969.
- Philip, J.R., "Nonuniform Leaching from Nonuniform Steady Infiltration," *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 48, pp. 740-749, 1984.
- Pollock, D.W., MODPATH: Documentation of Computer Program to Compute and Display Pathlines Using Results From the U.S. Geological Survey Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model (MODFLOW), U.S. Geological Survey OFR 89-381, 81 pp., 1989.
- Polubarinova-Kochina, P. Ya., *Theory of Ground Water Movement*, translated from the Russian by R.J.M. De Wiest, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 613 pp., 1962.
- Price, M., *Introducing Groundwater*, George Allen & Unwin, London, The United Kingdom, 195 pp., 1985.
- Prickett, T.A., and C.G. Lonquist, "Selected Digital Computer Techniques for Ground Water Resource Evaluation," *Illinois State Water Survey Bulletin* 55, 56 pp., 1971.
- Raats, P.A.C., "Steady Infiltration From Line and Furrows," *Soil Science Society of America. Proceedings.*, Vol. 34, pp. 709-714, 1970.
- Richards, L.A., "Capillary Conduction of Liquids Through Porous Medium," *Physics*, Vol. 1, pp. 318-333, 1931.
- Rumer, R.R., "Longitudinal Dispersion in Steady and Unsteady Flows," *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 88, pp. 147-172, 1962.
- Scheidegger, A.E., "General Theory of Dispersion in Porous Media," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, pp. 3273-3278, 1961.
- Şen, Z., *Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers*, CRC Lewis Publishers, New York, 444 pp., 1995.
- Shen, H.T., "Transient Dispersion in uniform Porous Media Flow," *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 102, pp. 707-716, 1976.
- Terzaghi, K., *Erdbaummechanik auf Bodenphysikalische Grundlage*, Franz Deticke, Leipzig, Germany, 390 pp., 1925.
- Theis, C.V., "The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage," *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 16, pp. 519-524, 1935.
- van Genuchten, M.T., and W.J. Alves, "Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation," U.S. Salinity Laboratory, Technical Bulletin Number 1661, Riverside California, 149 pp, 1982.
- Warren, J.E., and P.J. Root, "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs," *Trans. Soc. Pet. Eng. AJME*, Vol. 228, pp. 245-255, 1963.
- Warrick, A.W., "Time-Dependent, Linearized Infiltration: 1. Point Sources," *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 38, pp. 383-386, 1974.
- Warrick, A.W., "Analytical Solutions to the One-Dimensional Linearized Moisture Flow Equation for Arbitrary Input," *Soil Science*, Vol. 120, pp. 79-84, 1975.
- Warrick, A.W., and D.O. Lomen, "Time-Dependent Linearized Infiltration: 3. Strip and Disc Sources," *Soil Science Society of America. Journal*, Vol. 40, pp. 639-643, 1976.
- Zheng, C., "MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Ground Water System," Prepared for U.S. environmental Protection Agency, 1990/