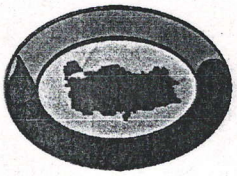
III. Ulusal Hidroloji Kongresi



27-29 Haziran 2001, İzmir

Editörler

Doç. Dr. Sevinç Özkul
Doç. Dr. Türkay Baran
Prof. Dr. Nilgün Harmancıoğlu

III. Ulusal Hidroloji Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 465-472
27-29 Haziran 2001, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir

DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN KOŞULLARDA TOPRAKTA SU AKIŞI VE TUZ HAREKETİNİN MODELLENMESİ

Dursun BÜYÜKTAŞ **Feridun HAKGÖREN** **Ruhi BAŞTUĞ**
Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi
Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Antalya

ÖZET: Bu çalışmada suyla doygun veya doygun olmayan topraklardaki su ve tuz hareketini tanımlayan temel ilkeler verilmiş ve bunların nümerik çözümleri sunulmuştur. Richards eşitliğinin nümerik veya analitik çözümü için gerekli olan toprak suyu karekteristik eğrileri ve farklı su içeriklerine karşı hidrolik iletkenlik eğrilerinin tanımlanmasında kullanılan yaklaşımlar incelenmiştir. Nümerik çözümlerde kullanılan yöntemlerin yararları ve sakıncaları üzerinde durulmuştur. Geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan modeller tanıtılmaya çalışılmış ve bu modellerin tarla kosullarında kullanım olanakları, üstün yönleri ve sakıncaları tartışılmıştır. Son olarak, okuyucuya bir fikir vermek amacıyla modellerden elde edilen sonuçlar sayısal örnek olarak sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: poroz ortamda su akışı, tuz hareketi, nümerik yöntemler, nümerik modeller, modelleme.

Modeling Water Flow and Salt Transport in Variably Saturated Soils

ABSTRACT: *In this study, basic principles describing water flow and solute transport in variably saturated porous media and their numerical solutions are given. Different approaches for representing the water retention and unsaturated hydraulic conductivity curves, which are necessary to solve Richards equation, are investigated. The advantages and disadvantages of the numerical methods used to solve water flow and solute transport equations are discussed. The models, which were developed and widely used, are described and the possibilities to use those models under field conditions are examined. Finally, the results obtained from models are compared with data or numerical solutions to give an idea to the readers.*

KEYWORDS: *water flow in porous media, solute transport, numerical methods, numerical models, modeling.*

1. GİRİŞ

Topraktaki su akışı ve buna bağlı tuz veya diğer kimyasal bileşiklerin hareketinin modellenmesi, son yıllarda çevresel duyarlılığın da artmasıyla, oldukça önem kazanmaya başlamıştır. Topraktaki su hareketinin tanımlanmasında Richards eşitliği, tuz ve diğer kimyasalların hareketinin tanımlanmasında ise konveksiyon-dispersiyon eşitliği (CDE) yaygın olarak kullanılmaktadır. Topraklarda su akışını veya tuz taşınımını tanımlayan eşitliklerin çözümünde analitik veya nümerik metotlar kullanılır. Ancak analitik çözümler çok özel ve sınırlı durumlar için mümkündür. Bu özel durumlar için geliştirilen çözümler de uygulamada kullanılmaktan çok geliştirilen nümerik çözümlerin doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Aslında analitik yöntemlerin kullanılmasındaki temel sorun, çözümlerin toprak özellikleri, problemin başlangıç ve sınır koşulları için bir çok kısıtlayıcı varsayımlar sonucunda elde edilmesidir. Örneğin analitik çözümleri elde etmek için yaygın olarak kullanılan varsayım, toprağın hidrolik iletkenlik yönünden homojen ve izotropik olduğudur.

Ancak yapılan bu varsayım tarla koşullarında geçerli değildir. Nümerik yöntemlerde, analitik yöntemlerde olduğu gibi, kısıtlayıcı varsayımların yapılmasına gerek yoktur. Farklı toprak özellikleri ve oldukça karmaşık sınır koşullarını nümerik model içerisinde uygulamak mümkündür.

Su akışı ve tuz taşınımı eşitliklerinin nümerik çözümlerinde farklı yöntemler bulunmakta ve kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en yaygın kullanılanları, sonlu farklar (Lapidus ve Pinder, 1999) ve sonlu elemanlar yöntemleridir (Istok, 1989). Sonlu farklar yöntemi ilk defa 1960'ların ortalarında, sonlu elemanlar metodu ise 1970'lerin başlarında yeraltı sularının akışı ve tuz taşınımı ile ilgili problemlere uygulanmaya başlanmıştır. Sonlu farklar yöntemi sonlu elemanlar yöntemine göre daha basit ve daha az bir matematik bilgisi gerektirir. Her iki yöntemin de diferansiyel denklemlere uygulanması sonucu, problemin başlangıç ve sınır değerlerini de gözönünde tutarak, bir dizi matris elde edilmekte ve elde edilen bu matrisler çeşitli iterasyon (örneğin Newton-Raphson, Picard) yöntemleri (Cooley, 1983) kullanılarak bilgisayar yardımı ile çözülüp sonuçlara ulaşılmaktadır. Anılan yöntemler kullanılarak çok sayıda model geliştirilmiş ve halen de geliştirilmeye devam edilmektedir.

Şu anda varolan matematiksel modeller (eşitlikler) gerçek sistemin büyük oranda basitleştirilmiş bir tanımlamasıdır. Suyun ve tuzun, toprak yüzeyinden aküfere doğru ve aküfer içerisindeki hareketi oldukça karmaşıktır. Bu taşınma sırasında olan birçok kimyasal ve fiziksel olaylardan çok azını anlayabilmekteyiz. Bu nedenle gerçekte meydana gelen bütün bu olayları, tek bir eşitlikle tanımlayabilmek oldukça zordur.

Bu çalışmada, doygun ve doygun olmayan topraklarda su akışı ve tuz hareketini tanımlayan temel eşitlikler ve bu eşitlikleri kullanarak geliştirilen modeller verilmiştir. Toprak hidrolik özelliklerini tanımlayan yaklaşımlar incelenerek bu yaklaşımlar kullanıldığında uyulması gerekli kısıtlar sunulmuştur. Son olarak, modellerden elde edilen sonuçlar ölçülmüş veriler veya analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır.

2. TEMEL EŞİTLİKLER

2.1. Su Akışı

Değişik düzeylerde suyla doygun olan topraklardaki su akışı, Darcy ve Kütlenin Korunumu yasalarının birleştirilmesiyle elde edilen Richards eşitliği ile açıklanabilmektedir. Üç boyutlu temsili bir elemental hacimde akan su için, kütlenin korunumu eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir (Tindall ve Kunkel, 1999).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} - S \qquad (1)$$

Eşitlikte, θ hacimsel su içeriğini, q_i akının ilgili yöndeki bileşenini, S kaynak veya tüketimi (örneğin suyun bitki kökleri tarafından alınımı), t zamanı x_i kartezyen koordinatları (yukarı yön pozitif olarak alınmıştır) göstermektedir. Birim kesit alandan geçen debi için aşağıdaki şekilde verilen Darcy yasası kulanılır.

$$q_i = -K(K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}) \qquad (2)$$

Eşitlikte, K doygun olmayan hidrolik iletkenlik fonksiyonunu, h basınç yükünü ve K_{ij} poroz ortamın olası anizotropik doğasını temsil eden boyutsuz anizotropik tensör bileşenlerini göstermektedir. Eşitlik (2) eşitlik (1)'de yerine konulduğunda Richards eşitliği olarak bilinen, değişik düzeylerde suyla doygun koşullarda su akşını tanımlayan denklem elde edilmektedir.

$$C\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K\left(K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}+K_{iz}\right)\right]-S \tag{3}$$

Eşitlikte $C=d\theta/dh$, toprak su karekteristik eğrisinin eğimi olup su kapasitesi olarak da adlandırılmaktadır. Yukarıdaki eşitlik bazı varsayımlarla elde edilmiştir. Bu varsayımlar şöyle sıralanabilir: Eşitlikte toprak matriksinin ve sıvının sıkışabilirliği ihmal edilmekte ve sıvının yoğunluğunun konsantrasyondan bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Sıvı yoğunluğunun yersel değişiminin ve sıcaklığın da su akışı üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu kabul edilmiştir. En önemlisi de, anılan eşitliğin doygun olmayan kosullarda hava fazının su akışı üzerinde etkisinin olmadığı, dolayısıyla doygun ve doygun olmayan koşullarda su akışını tanımlamada tek bir eşitliğin kullanılabileceği öngörülmektedir (Nielsen vd, 1986).

2.2. Tuz Taşınımı

Topraklardaki tuz veya diğer kimyasal maddelerin taşınımı, Fick'in ikinci yasası ve Kütlenin Korunumu yasasının birleştirilmesiyle elde edilen konveksiyon-dispersiyon eşitliği ile açıklanmaktadır. Doygun olmayan koşullarda elemanter bir hacimde konsantrasyon için Kütlenin Korunumu Yasası aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir (Fetter, 1999).

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho s)}{\partial t}=-\frac{\partial J}{\partial x_i} \tag{4}$$

Eşitlikte, θ hacimsel su içeriğini, c tuz konsantrasyonunu, ρ toprağın birim hacim ağırlığını, s toprak tarafından adsorbe edilen tuz konsantrasyonunu, J konvektif ve dispersif akının toplamını göstermektedir. Toplam akı için Eşitlik (5) ve adsorbe olan konsantrasyon için de doğrusal izoterm ilişkisi (Eşitlik 6) yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında konveksiyon-dispersiyon eşitliği (eşitlik 7) elde edilir.

$$J=-\theta D_{ij}\frac{\partial c}{x_j}+q_i c \tag{5}$$

$$s=kc \tag{6}$$

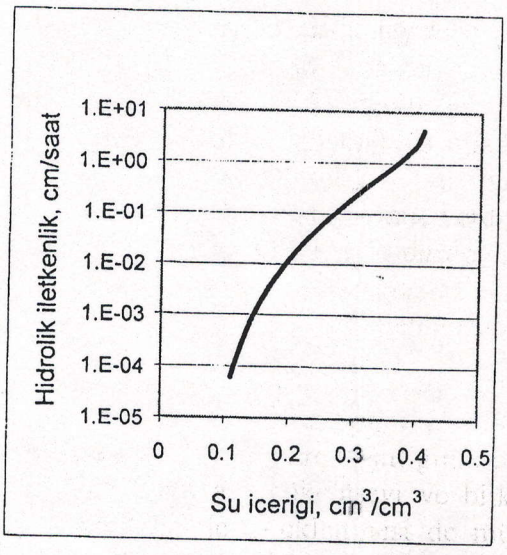
$$\theta R\frac{\partial c}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}\right)-q_i\frac{\partial c}{\partial x_i} \tag{7}$$

Yukarıdaki eşitliklerde D_{ij} dispersiyon katsayısını (Bear, 1972), k dağılım katsayısını, R gecikme (retardasyon) katsayısını ($R=1+\rho k/\theta$) göstermektedir. Eşitlik 7'deki hacimsel su içeriği (θ) ve akı (q) Richards eşitliğinin çözümünden elde edilmektedir. Eşitliğin sağ tarafına kimyasal bozunmaları, çökelmeyi ve bitki besin maddelerinin alımlarını temsil edebilecek matematiksel ilişkilerin eklenmesi de mümkündür. Ancak anılan eşitlikle ilgili en önemli varsayım, eşitliğin sabit sıcaklık ve basınç altında seyreltik çözeltiler için geliştirilmiş olmasıdır (Bird vd, 1960).

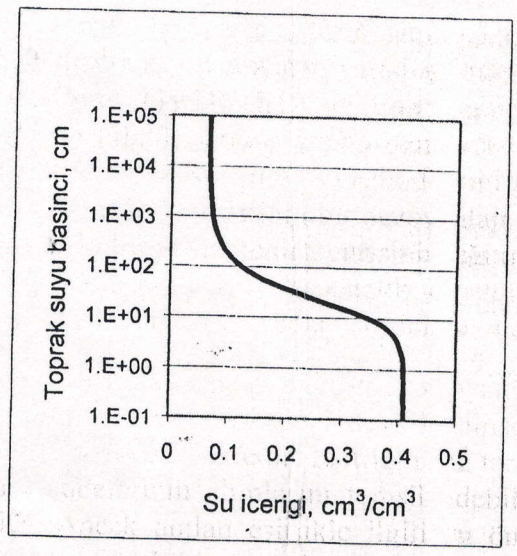
3. TOPRAK HİDROLİK KAREKTERİSTİK EĞRİLERİ

Su akış eşitliğindeki K ve C, su içeriği (θ) veya matrik basınç yükünün (h) histeretik bir fonksiyonudur. Bu nedenle anılan diferansiyel denklem doğrusal olmayıp K ve C'nin tahmini su akış eşitliğinin çözümü için büyük önem taşımaktadır.

Toprağın hidrolik karekteristik eğrilerini matrik basıncın veya su içeriğinin bir fonksiyonu olarak (Şekil 1 ve 2) ifade eden bir çok eşitlik geliştirilmiştir. Bunların içerisinde nümerik modellerde yaygın olarak kullanılanları Brooks ve Corey (1964) (BC) ve Van Genuchten (1980) (VG) tarafından geliştirilmiş olanlarıdır. Russo (1988), kolon drenaj denemelerinde elde ettiği hidrolik özellikleri BC ve VG modelleri ile karşılaştırmış, VG modelinin daha doğru ve verilerle daha tutarlı sonuç verdiğini belirtmiştir. BC modelinin bir dezavantajı hem topraksu karekteristik eğrisi hem de doygun olmayan hidrolik iletkenlik eğrisinin eğiminde hava giriş basıncı olarak adlandırılan süreksizliğin olmasıdır. Bu süreksizlik doygun ve doygın olmayan su akış problemlerinin nümerik çözümlerinde bazı sorunlara neden olabilmektedir (Van Genuchten, 1980). VG modelinde ise böyle bir süreksizlik sözkonusu değildir.



Şekil 1. Hidrolik iletkenlik eğrisi



Şekil 2. Toprak su karekteristik eğrisi

Toprak su karekteristik eğrisi için Van Genuchten (1980) aşağıda verilen modeli önermiştir.

$$\theta(h)=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)\left[1+(\alpha|h|)^n\right]^{-m} \qquad (8)$$

Eşitlikte α, $n>1$, ve m=1-1/n toprak tipine bağlı olarak değişen eğri uydurma parametreleri, θ_s hacimsel olarak doygun su içeriği, θ_r kalıcı (residual) su içeriği olarak adlandırılmaktadır. Matematiksel olarak θ_r, matrik basınç yükü çok büyük olduğunda, hem dθ/dh hem de hidrolik iletkenlik (K) değerinin sıfır olduğu durumdaki su içeriği olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla bu parametre bir eğri uydurma parametresi olup toprakta bulunabilecek en düşük su içeriğini yansıtmayabilir (Tindall ve Kunkel, 1999).

Van Genuchten (1980) doygun olmayan hidrolik iletkenliği ise Mualem (1976)'dan modifiye ettiği aşağıdaki eşitlik ile ifade etmektedir.

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^l \left[1-\left(1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta-\theta_r}\right)^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (9)$$

Eşitlikte K_s doygun hidrolik iletkenliği ve l toprak gözeneklerinin birbiriyle bağlantılarını gösteren bir parametre olup Mualem (1976) tarafından çoğu topraklar için yaklaşık olarak 0.5 olarak verilmektedir.

Brooks ve Corey (1964) ise topraksu karekteristik eğrisi için aşağıdaki modeli önermiştir.

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s-\theta_r)\left(\frac{h_{ae}}{h}\right)^{\lambda} \quad (10)$$

Eşitlikte h_{ae} hava giriş basıncını ve λ toprak tipine göre değişen gözenek büyüklük indeksini göstermektedir.

Brooks ve Corey (1964) doygun olmayan hidrolik iletkenlik eğrisi için aşağıdaki modeli vermiştir.

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^n \quad (11)$$

Eşitlikte n toprak tipine bağlı bir sabit olup n=3+2/ λ bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Brooks ve Corey (1964) ve Van Genuchten (1980) tarafından toprak karekteristik eğrileri için verilen eşitliklerin eğer aşağıdaki kısıtları sağlamazsa, kuru topraklarda infiltrasyonu olduğundan daha fazla tahmin edeceği belirtilmektedir (Fuentes vd, 1991).

$\lambda>1$ (Brooks ve Corey, 1964) (12)

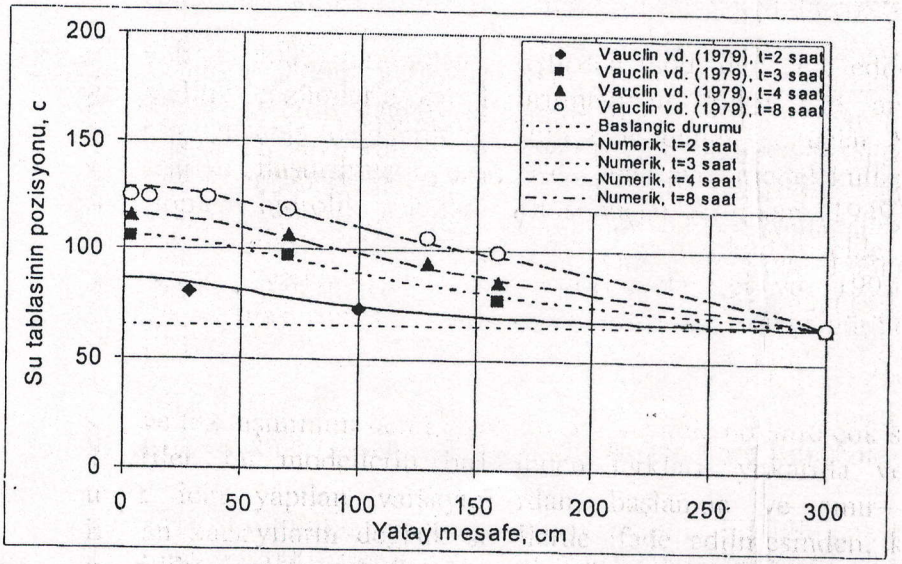
$mn>1$ (Van Genuchten, 1980) (13)

4. NÜMERİK MODELLER

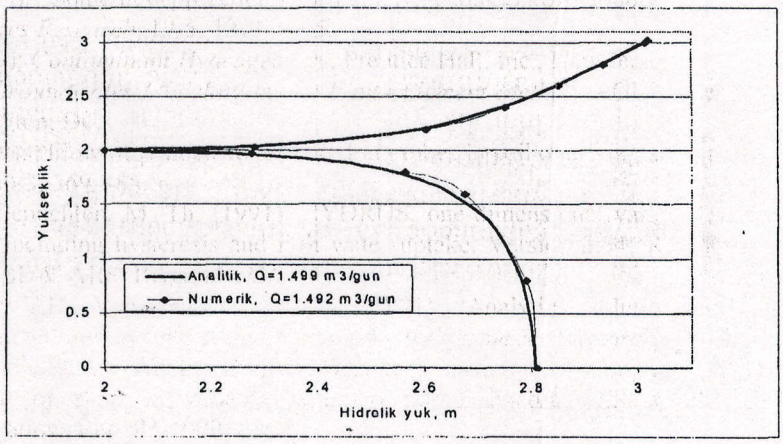
Topraklarda su akışını ve tuz taşınımını tanımlayan bir, iki veya üç boyutlu çok sayıda model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellerin birbirinden farkları, yukarıda verilen temel eşitlikleri elde etmek için yapılan varsayımlardan, başlangıç ve sınır koşullarının tanımlarından, kullanılan katsayıların değişik şekillerde ifade edilmesinden, kaynak veya tüketim için seçilen eşitliklerden veya kullanılan nümerik yöntemlerden kaynaklanmaktadır (Büyüktaş, 2000).

Geliştirilen modellerden bir boyutlu olanlarına Kool ve Van Genuchten (1991), Vogel vd. (1993); iki boyutlu olanlarına Voss (1984), Lapalla vd. (1987), Simunek vd. (1994), Tarboton (1997); üç boyulu olanlarına ise Srivastava ve Yeh (1992), Simunek vd. (1995), Somma vd. (1998) ve Büyüktaş (2000) örnek olarak gösterilebilir. Bu modellerden Büyüktaş (2000) su akış ve tuz taşınım eşitliklerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözmektedir. Model içerisinde farklı sulama yöntemleri, kök gelişimi ve drenaj seçeneklerini kullanmak mümkündür.

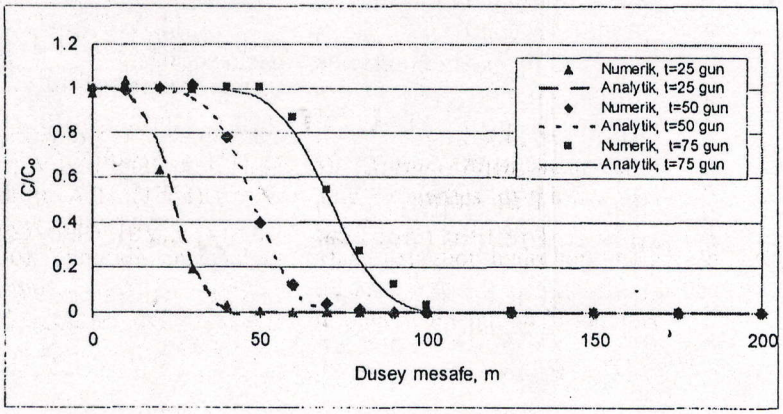
Şekil 3, 4 ve 5'de Büyüktaş (2000) tarafından geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar ölçülen veriler veya analitik çözümlerle karşılaştırılmaktadır. Şekil 3'te, anılan model kullanılarak su tablasının zamanla değişimine ilişkin elde edilen sonuçlar Vauclin vd. (1979)'dan alınan verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4'de gene aynı model kullanılarak elde edilen dren üzerindeki toplam hidrolik yük ile ilgili sonuçlar Kirkham (1949) tarafından verilen analitik çözümle karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te ise modelden elde edilen tuz konsantrasyonunun zamansal ve yersel değişimine ilişkin sonuçlar Leij vd. (1991) tarafından verilen analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Anılan şekillerden de açıkça görüleceği üzere, nümerik model sonuçları ile analitik çözümler veya veriler arasında oldukça iyi bir uyuşma vardır.



Şekil 3. Su tablası pozisyonun zamanla değişimi.



Şekil 4. Dren üzerinde hidrolik yük.



Şekil 5. Tuz konsantrasyonunun değişimi.

KAYNAKLAR

Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publ., New York.

Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. (1960): *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964): "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University Hydrology. Paper No. 3.

Büyüktaş, D. (2000): Three-dimensional subsurface irrigation hydrology model, Ph.D. Dissertation, University of California, Davis.

Cooley, R.L. (1983): "Some new procedures for numerical solution of variably saturated flow problems", *Water Resources Research*, 19-5, 1271-1285.

Fetter, C.W. (1999): *Contaminant Hydrogeology*, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

Istok, J. (1989): *Groundwater Modeling by the Finite Element Method,* AGU Water Resources Monograph 13, Washington, DC.

Kirkham, D. (1949): "Flow of ponded water into drain tubes in soil overlying an impervious layer", *EOS. Trans. AGU*, 30-3, 369-385.

Kool, J.B., Van Genuchten, M. Th. (1991): HYDRUS, one-dimensional variable saturated flow and transport model, including hysteresis and root water uptake. Version 3.31. Res. Report No. 124, US Salinity Lab., USDA, ARS, Riverside, CA.

Leij, F.J., Skaggs, T.H., Van Genuchten, M.Th. (1991): "Analytical solutions for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous media", *Water Resources Research,* 27-10, 2719-2733.

Lapalla, E.G., Healy R.W., Weeks, E.P. (1987): Documentation of computer program VS2D to solve the equation of fluid in variable saturated porous media. U.S. Geol. Survey Water Resources Investigations Rep. 83-4099.

Lapidus, L., Pinder, G.E. (1999): *Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Mualem, Y. (1976): "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, 12, 513-522.

Nielsen, D.R., Van Genuchten, M.Th., Biggar, J.W. (1986): "Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone", *Water Resources Research*, 22-9, 89S-108S.

Russo, D. (1988): "Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties", *Water Resources Research*, 24-3, 453-459.

Simunek, J., Vogel, T., Van Genuchten, M.Th. (1994):The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variable-saturated media, Version 1.2. USSL/ARS, Report No 132.

Simunek, J., Huang, K., Van Genuchten, M.Th. (1995): The SWMS_3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variable-saturated media, USSL/ARS, Report No 139,.

Somma, F., Hopmans, J.W., Clausnitzer, V. (1998): "Transient three-dimensional modeling of soil water and solute transport with root growth, root water and nutrient uptake", *Plant and Soil*, 202, 281-293.

Srivastava R., Yeh, T. C. J. (1992): "A three-dimensional numerical model for water flow and transport of chemically reactive solute through porous media under variable saturated conditions", *Adv. in Water Resources*. 15, 275-287.

Tarboton, K.C. (1997): Integrated hydrological model irrigation drainage management, Ph.D. Dissertation, University of California, Davis.

Tindall, J.A., Kunkel, J.R. (1999): *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

Van Genuchten, M. Th. (1980): "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.

Vauclin, M., Khanji, D., Vachaud, G. (1979): "Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem", *Water Resources Research*. 15-5, 1089-1101.

Vogel, T., Zhang R., Van Genuchten, M.Th. (1993): S_1D Software package for simulating water solute and heat flow in variable saturated porous media. Res. Report. US Salinity Lab., USDA, ARS, Riverside, CA.

Voss, C.I. (1984): A finite element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density dependent ground-water flow with energy, transport, or chemically-reactive single species solute transport. U.S. Geol. Survey Water Resources Investigations Rep. 84-4369.