



Toprak Nem Değişiminin HYDRUS Programı Yardımla Modellenmesi

Kürşad Demirel¹

¹ÇOMÜ Ziraat Fakültesi, Tarımsal Sensör ve Uzaktan Algılama Laboratuvarı, 17020/Çanakkale.
Sorumlu yazar: kdemirel@comu.edu.tr

Geliş Tarihi: 12.02.2014

Kabul Tarihi: 06.03.2014

Öz

Küresel ısınmayla birlikte su daha da önemli bir tarımsal girdi olmuştur. Tarımsal üretimde, nitelikli ve bol ürün alınabilmesi için bitkilerin yetiştirme koşullarını etkileyen faktörlerin ortaya konulması gerekmektedir. Toprak nemi bu faktörlerin en başında gelmektedir. Bitkilerin bu nemden yararlanabilmeleri için belli sınırlarda tutulması oldukça önemlidir. Uzaktan algılama, hassas tarım uygulamaları, yüzey ve yüzey altı su akışları, toprak–su–bitki–atmosfer modelleri güvenilir ve eş zamanlı olarak ölçülen toprak nemi değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Arazi ve laboratuvar koşullarında, toprak içerisindeki su hareketinin veya toprak nem değişiminin belirlenmesi oldukça zor ve zaman alıcıdır. Son zamanlarda, bilgisayar modelleri ile toprak neminin ve toprak içerisindeki su akışının simülasyonu daha kolay yapılabilmektedir. Bu amaçla kullanılan HYDRUS, toprak su akışının izlenmesinde en yaygın olarak kullanılan programlardan birisidir. Bu çalışmada, HYDRUS programı ve örnek bir uygulama ile programın kullanımı için gerekli verilerin tanıtılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Modelleme, HYDRUS, Toprak nemi.

Abstract

Modeling of the Change of Soil Moisture Using HYDRUS Program

Water has been a more important agricultural input due to global warming. In agricultural production, in order to produce high quality and more products factors affecting plant growth should be well understood. Soil moisture is one of the most important of these factors. It is very important to keep the moisture in certain limits in order to make it beneficial for the plants. Remote sensing, precision agriculture applications, surface and subsurface water flow, soil–water–plant–atmosphere models require reliable and simultaneously measured soil moisture values. The determination of the variation of soil moisture or water movement in the soil under land and laboratory conditions is quite difficult and time consuming. In recent years, the simulation of moisture and water flow in the soil with computer models can be performed more easily. HYDRUS is one of the most commonly used programs in soil water flow tracing. In this study, it was aimed to describe the HYDRUS program and required data format along with a sample application using the program.

Keywords: Modeling, HYDRUS, Soil moisture.

Giriş

Toprak nemi, ürünlerin büyümesine ve verimliliğine etki eden önemli bir faktördür. Toprak neminin yersel ve zamansal değişiminin bilinmesiyle su kaynaklarımız daha verimli olarak kullanılabilir ve çevrenin kirlenmesi daha da azaltılabilir. Toprak neminin belirlenmesinde; gravimetrik yöntem, nükleer yöntem, tansiyometre ve elektriksel direnç blokları gibi farklı yöntemler sayılabilir. Söz konusu yöntemler ile aynı gün içerisinde farklı zamanlarda toprak neminin belirlenmesi zaman ve işgücü açısından sorun oluşturmaktadır. Ancak son yıllarda elektromanyetik algılayıcılar, toprak neminin belirlenmesi ve sürekli izlenmesinde kullanılmaktadır. Toprak nem sensörleri, radyoaktif olmamaları, toprağın yüzeye yakın kısımlarında da doğru ölçümlerin yapılabilmesi, toprak neminin anlık olarak izlenmesi, çok az veya hiç bakım istememesi, kış boyunca toprak içerisinde kalabilmesi, son yıllarda maliyetlerinin sürekli düşüş göstermesi, bitkinin optimum gelişimi için verilmesi gereken su miktarının hesaplanmasında diğer yöntemlere göre olan kolaylığı nedeniyle sulama uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır (Topp, 2003).

Elektromanyetik algılayıcılar ile toprak içerisindeki nem değişiminin ve su akışının belirlenmesi, kolay olmasına rağmen, zor ve maliyetli olmaktadır. Ancak, toprak su hareketinin simülasyon modellerinin kullanımı ile belirlenmesi pahalı olmayan bir yöntemdir. Bu amaçla, bilgisayar modelleri topraklarda su hareketini tahmin etmek için sıklıkla ve etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Anlauf ve ark., 2012). Toprak ve yer altı sularında; su, besin elementi, kimyasal elementlerin taşınımının modellenmesi ile ilgili birçok program (HYDRUS, SWIM, SEAWAT, MODFLOW, FLOWPATH vb.) bulunmaktadır. HYDRUS yazılım programları toprak içerisindeki su



akışı ve çözülmüş madde transferi konusunda en çok kullanılan modelleme programları arasında bulunmaktadır (Simunek ve ark., 2008a). Üç farklı HYDRUS (HYDRUS–1D (Simunek ve ark., 1998), HYDRUS–2D (Simunek ve ark., 1999), HYDRUS–2D/3D (Sejna ve Simunek, 2007) yazılım paketi bulunmaktadır. Her üç yazılım da temel olarak benzer çalışma prensibine sahip olmasına rağmen, HYDRUS–1D; lizimetre, toprak profili ve parsellerde tek boyutlu problemleri, HYDRUS–2D; laboratuvar ve arazi ölçekli çalışmalarda karşılaşılan iki veya üç boyutlu aksisimetrik problemlerinin çözümünde, HYDRUS–2D/3D ise iki ve üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Simunek ve ark., 2008a). Bahsi geçen HYDRUS programları ile yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Vrugt ve ark. (2001), badem ağacında HYDRUS/1D, HYDRUS/2D ve HYDRUS/3D model programları kullanılarak toprak nem içeriğinin tahmin edilebilirliğini araştırmışlardır. Modelleme sonucunda, HYDRUS/1D, HYDRUS/2D ve HYDRUS/3D modelleme programlarında, belirtme katsayılarını (R^2) sırasıyla 0,98, 0,91 ve 0,92 ve hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) değerlerini ise $0,0068 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0,0152 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ve $0,0180 \text{ m}^3/\text{m}^3$ olarak bulmuşlardır. Skaggs ve ark. (2004), toprağa üç farklı sulama suyu miktarı (20, 40 ve 60 L/m) uygulayarak HYDRUS/2D modelleme programında suyun hareketinin simülasyonu oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, RMSE değerlerini farklı uygulamalara göre $0.012\text{--}0.071 \text{ m}^3/\text{m}^3$ arasında hesaplamışlardır. Provenzano (2007), toprak altı damla sulama yönteminde 2 farklı damlatıcı debisinde (2 ve 4 l/s), infiltrasyon sürecini HYDRUS–2D simülasyon programını kullanarak belirlemiştir. Araştırmacı, söz konusu programın toprak içerisindeki infiltrasyon sürecini izlemede başarılı olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Zhou ve ark. (2007), Çin’de, bağda yapmış oldukları çalışmada, farklı derinliklerde (0–10 cm ve 10–20 cm) toprak nem içeriklerini tahminlemek için HYDRUS/2D programını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, korelasyon katsayısı (r) ve RMSE değerlerini sırasıyla 0,730–0,943 ve 0,012–0,031 cm^3/cm^3 arasında bulmuşlardır. McCoy ve McCoy (2009), Amerika’da çimde farklı derinliklere yerleştirilen sensörler yardımıyla toprak nemini belirlemişler ve elde edilen toprak nem değerlerini HYDRUS/2D modelleme programı ile karşılaştırmışlardır. Modelleme sonucunda, model etkinliği (ME), RMSE ve ortalama mutlak hata (MAE) değerlerini denemenin ilk yılında sırasıyla 0,40–0,78, 0,015–0,024 m^3/m^3 ve 0,012–0,021 m^3/m^3 , denemenin ikinci yılında ise sırasıyla 0,33–0,69, 0,019–0,028 m^3/m^3 ve 0,016–0,024 m^3/m^3 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, HYDRUS/2D model programının arazi koşullarındaki toprak nem içeriğini belirlemede oldukça başarılı olduğunu bildirmişlerdir. Anlauf ve ark. (2012) İki farklı yetiştirme ortamında, toprak nem değerlerini tahmin etmek için HYDRUS–1D programı kullanmışlar ve gerçek ile tahmin edilen nem değerleri arasındaki R^2 değerlerinin 0,91–0,96 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Demirel (2012), çim bitkisinde yapmış olduğu çalışmada, çim bitkisinin etkili kök derinliğindeki toprak nemini tahmin etmek için nem sensörleri yardımıyla ölçülen değerler ile HYDRUS–2D programı kullanarak elde ettiği değerleri karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, denemenin ilk yılında r, RMSE, MAE ve ME değerlerini sırasıyla 0,80–0,91, 0,015–0,035 m^3/m^3 , 0,012–0,031 m^3/m^3 ve 0,28–0,56 arasında, ikinci yıl ise 0,74–0,94, 0,015–0,034 m^3/m^3 , 0,011–0,027 m^3/m^3 ve 0,22–0,43 arasında değiştiğini bildirmiştir. Bufon ve ark. (2012), damla sulama yöntemiyle sulanan pamuk bitkisinde, toprak su içeriğini HYDRUS–2D model programında kullanarak HYDRUS programının sulama stratejilerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Son zamanlarda yapılan toprak içerisinde su hareketi ile ilgili çalışmalarda HYDRUS programının kullanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, toprak nem içeriğini tahmin etmek için kullanılan HYDRUS programının tanıtımı, çalışma prensibi ve kullanıma olanakları hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, HYDRUS–1D programında örnek bir uygulama yapılmıştır.

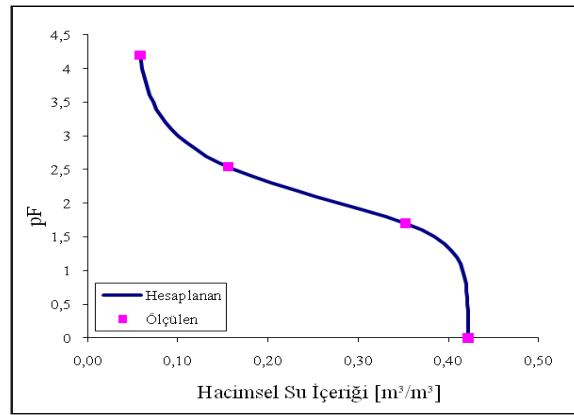
HYDRUS Programı ve Model Girdileri

HYDRUS, toprak içerisinde sürekli akışın olmadığı doymuş ve doymamış koşullar için Richard eşitliğinin (Eşitlik 1.) sayısal çözümünü bilgisayar ortamında çalıştıran bir programdır. Richard eşitliği genel bir denklem olup, tüm HYDRUS model programlarında benzer eşitlikler bulunmaktadır (Blonquist ve ark., 2006).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

Eşitlikte, K : hidrolik iletkenlik (m/s), h : basınç yükü (matrik potansiyel) (m), z : düşey mesafe (m), θ : hacimsel su içeriği (m^3/m^3), t : zaman (s)

HYDRUS model programının toprakla ilgili girdileri arasında hacim ağırlığı, hidrolik iletkenlik ve toprak su karakteristik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Hacim ağırlığı; toprak örneklerinin kuru ağırlığının örnek hacmine oranı ile bulunmaktadır. Hidrolik iletkenlik; arazi veya laboratuvar koşullarında permeametre ile belirlenebilmektedir. Toprak su karakteristik özellikleri; laboratuvar ortamında pF cihazı yardımıyla, farklı basınçlar altında hacimsel su içerikleri belirlenerek, ölçülen bu değerler yardımıyla su tutma eğrisi oluşturulmaktadır (Şekil 1.). Parametrelerin belirlenmesi, belirli bir toprak suyu basıncındaki ölçülen ve tahmin edilen hacimsel su içeriği arasındaki farkın azaltılması esasına dayanmaktadır (Büyüktaş ve Hakkören, 2005). Hacimsel su içeriği (θ) Eşitlik 2 yardımıyla belirlenmiştir (Van Genuchten, 1980). Su tutma eğrisi için Van Genuchten–Mualem (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) formülasyonunun kombinasyonu, doymamış koşullarda hidrolik iletkenlik fonksiyonunu (Eşitlik 3.) açıklamak için kullanılmaktadır (Simunek ve ark., 2008b).



Şekil 1. Su tutma eğrisi (Demirel, 2012).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (2)$$

Eşitlikte, θ : hacimsel su içeriği (m^3/m^3), θ_s : doymuş su içeriği (m^3/m^3), θ_r : hacimsel olarak kalıcı su içeriği (m^3/m^3), α ($metre^{-1}$), $n > 1$, n ve α : parametre ve m : $1 - 1/n$.

$$K_\psi = K_s \cdot S_e^l \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (3)$$

Eşitlikte, K_ψ : matris potansiyelde hidrolik iletkenlik (ψ), K_s : doymuş koşullardaki hidrolik iletkenlik, S_e : etkili su içeriği ($(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$), l : toprağın gözenek yapısını açıklayan parametre (genellikle 0,5 alınır), m : $m = (1 - 1/n)$

Doymuş koşullardaki hidrolik iletkenlik (K_s) HYDRUS programında toprak tekstür ve hacim ağırlığı verileri ile tahmin edilmektedir (Çizelge 1.). Toprak örneği kuruduktan sonra yeniden doymuş hale geldiğinde matris potansiyel değeri aynı olmayabilir. Bu durum histerezis olarak bilinmektedir. HYDRUS modelinde histerezis olayının belirlenebilmesi için su tutma eğrisinin kuru ve yaş durumlardaki θ_r , θ_s ve n değerlerinin sabit kaldığı varsayılmaktadır (Simunek ve ark., 2008b). Sadece, α parametresi değişmektedir (Anlauf ve ark., 2012).

Çizelge 1. HYDRUS/2D programında kullanılan toprak parametre değerleri (Demirel, 2012)

θ_s	θ_r	α	n	K_s	l
0,422	0,052	0,015	1,745	167	0,5



HYDRUS programında, model girdisi olarak toprak özelliklerine ek olarak modelin uygulanacağı döneme ait sulama suyu miktarının, bitki su tüketiminin (buharlaşma (evaporasyon) ve terleme (transpirasyon)), yağış miktarının, toprak profilinin başlangıçtaki nem düzeylerinin, toprak profilinin kesitinin ve toprak sınır koşullarının (serbest drenaj olup olmadığı, toprak yüzeyinin atmosferik koşullara açık olup olmadığı vb.) bilinmesi gerekmektedir.

Belmans ve ark. (1983)'na göre; buharlaşma ve terleme değerlerinin modele ayrı ayrı girilmesi gerekmektedir. Bitki su tüketimi değerindeki buharlaşma ve terleme değerlerinin oranları Eşitlik 4 ve 5 yardımıyla hesaplanmıştır (Blonquist ve ark., 2006).

$$E = ET \cdot e^{-k \cdot LAI} \quad (4)$$

$$T = ET - E \quad (5)$$

Eşitlikte, k: güneş radyasyonu için bir katsayısı, LAI: bitkinin yaprak alan indeksi (birim alandaki toplam yaprak alanı) (m^2/m^2), ET: bitki su tüketimi (mm), E: toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşma, T: bitki yüzeyinden meydana gelen buharlaşma.

HYDRUS programında, k değeri birçok bitki için 0,39 (Ritchie, 1972; Feddes ve ark., 1978) olarak alınmıştır. LAI değeri ise bitki çeşidine göre değişmektedir. Blonquist ve ark. (2006), Kentucky Bluegrass çim çeşidinde LAI değerini 6 olarak belirlemişlerdir. Demirel (2012), çim bitkisinde k ve LAI değerleri sırasıyla 0,39 ve 6 olarak almış ve ilgili eşitlikte yerine konulduğunda, bitki su tüketiminin (ET) yaklaşık olarak %90'ının terleme (transpirasyon) ve %10'unun buharlaşmadan (evaporasyon) kaynaklandığı bildirmiştir.

Model Kalite Değerlendirilmesinde Kullanılan Eşitlikler

Modellerin değerlendirilmesinde farklı eşitlikler bulunmaktadır. Söz konusu eşitlikler HYDRUS modeli sonucunda tahmin edilen nem değerleri ile ölçülen nem değerleri arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu eşitlikler sırasıyla, korelasyon katsayısı (r) Eşitlik 6, oransal hata (bias) Eşitlik 7, hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) Eşitlik 8, oransal hata kareleri ortalamasının karekökü (RRMSE) Eşitlik 9, ortalama mutlak hata (MAE) Eşitlik 10, model etkinliği (ME) Eşitlik 11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} S_{YY}}} \quad (6)$$

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (7)$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N} \quad (8)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\bar{X}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - Y_i|}{N} \quad (10)$$



$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (11)$$

Eşitliklerde, X_i : Ölçülen hacimsel su içeriği (m^3/m^3), Y_i : Tahmin edilen hacimsel su içeriği (m^3/m^3), \bar{X} : Ölçülen hacimsel su içeriği ortalaması (m^3/m^3), N: Gözlem sayısı.

HYDRUS–1D model programının kalitesi kolayca değerlendirmek için ölçülen ve tahmin edilen değerler 1:1 duyarlılık analizinde değerlendirilir. Eğer tahmin edilen değerler gerçek değerleri ile aynıysa tüm noktalar 1:1 çizgisi üzerinde birleşir. Böyle durumlarda modelin kalitesinin iyi olduğu söylenir ve r değeri 1 olur. r değerinin yüksek olması arasındaki ilişkinin yani model tahminlemesinin iyi olduğunun bir göstergesidir. bias değerlerinin sıfıra yakın olması, düşük ve yüksek tahmin edilen değerlerin birbirini iptal etmesi veya tahmin edilen değerlerin gerçek değerler ile aynı olması nedeniyle modelin değerlendirilmesinde yetersiz olmaktadır (Anlauf ve ark., 2012). RMSE ve RRMSE değerleri ne kadar düşük olursa modelin kalitesi değerlendirilmesindeki hata payının düşük olduğunu gösterir. Legates ve McCabe (1999)'ya göre, RMSE değerleri genellikle MAE değerlerine eşit ya da büyüktür. Söz konusu değerlerdeki bu farklılık genellikle aykırı değerlerin bir göstergesi olmaktadır (McCoy ve McCoy., 2009). MAE sıfıra yakın olmalıdır. MAE ve bias ölçülen ve tahmin edilen veri olarak aynı birimlere sahiptir (Anlauf ve ark., 2012). ME değerleri $-\infty$ ile $+1$ arasında değişmektedir. ME değerinin 1'e yaklaşması tahmin edilen veriler ile ölçülen verilerin aynı oranda değişkenliği göstermektedir. Ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında farkın karesi, ölçülen veriler kadar büyük değişkenlik gösterdiği zaman ME sıfıra ulaşmaktadır. ME değerinin negatif değer alması modelin uygun olmadığını göstermektedir (Ahnert ve ark., 2007).

HYDRUS–1D Programında Örnek Uygulama

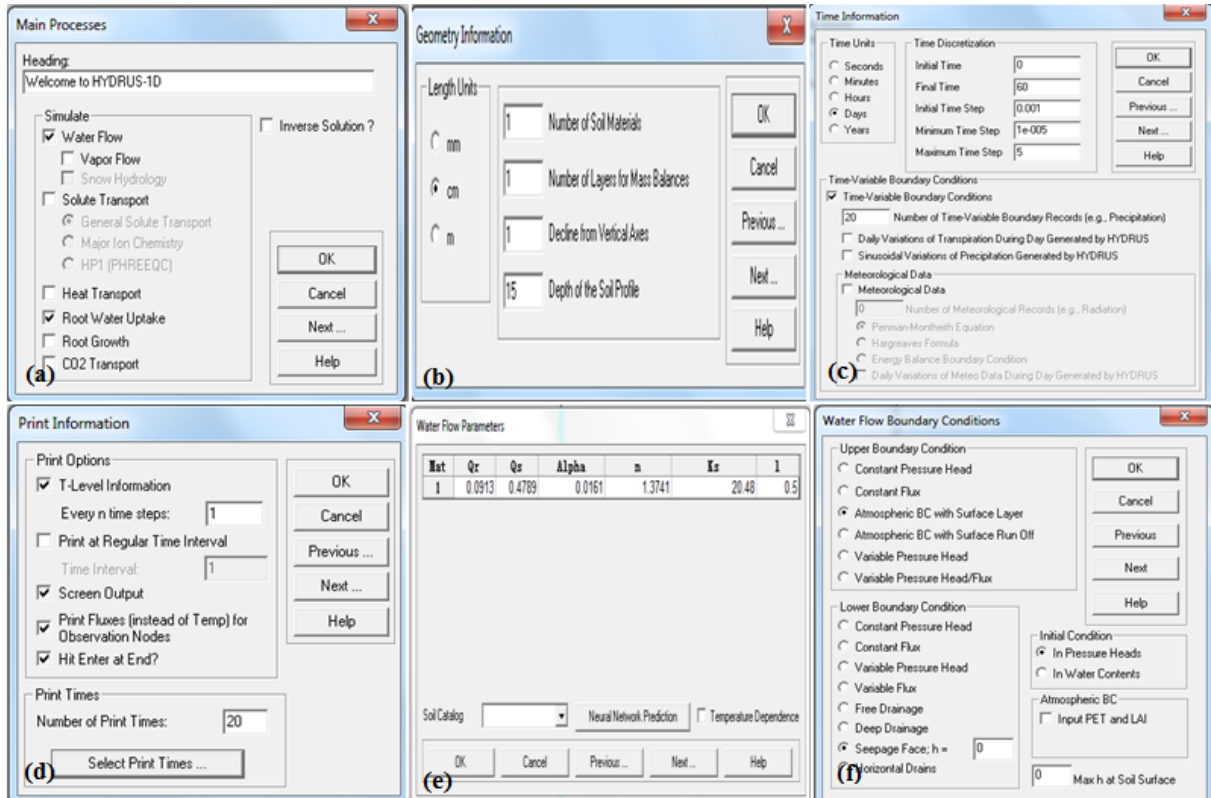
HYDRUS–1D programı ilgili adresten (<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d>) ücretsiz olarak indirilmektedir. Aşağıda bu programın kullanımına ilişkin bir örnek işlem sırasıyla özetlenmiştir (Şekil 2.). İlk olarak, program açıldığında, modelleme yapılacak kısım seçilmektedir. Örneğin, saksı ortamında yetiştirilen bir bitkinin toprak içerisinde su akışının modellenmesi için su akışı (water flow) ve kök su alımının (root water uptake) seçilmesi gerekir (Şekil 2a.). Sonraki adımda, modellemede kullanılacak birim seçilir (Şekil 2b.). Seçilen birime göre programda sonraki işlemlerde tüm parametreler aynı birimin kullanılması gerekir. Aynı pencerede toprak derinliği değeri girilir. Örneğin 15 cm derinliğindeki bir saksıda bu değer 15 olarak girilir (Şekil 2b.). Bir sonraki adımda, zaman birimi seçilir (times unit). Bu pencerede eğer gün (day) seçilirse model programındaki tüm değerlerin cm/gün olarak girilir (Şekil 2c.). Aynı pencerede, deneme süresinin girilmesi gerekir. Örneğin; çalışma 60 gün sürücekse ve 1. günden 60. güne kadar değerlerin modellenmesi isteniyorsa başlangıç zamanına (initial time) 0 ve bitiş zamanına (final time) 60 değeri girilir. Ayrıca, örneğin sulama aralığı 6 gün olarak planlanırsa, 10 sulama periyodu ve 10 da sulama öncesi periyot seçilerek toplam 20 adet değer girilmesi (Time–Variable Boundary Conditions) gerekir. Bu periyot sayısı, kullanıcının amacına ve koşullara bağlı olarak değişir (Şekil 2c.). Sonraki işlemde, çıktı bilgilerinin girilmesi gerekir. Örneğin 60 günlük bir çalışmada, her üç gün için bir değer versin diye düşünülürse, buraya (number of print times) 20 değeri girilir (Şekil 2d.). Sonraki adımda, Çizelge 1.'de de örneği verilen toprak parametreleri girilmelidir. Bu parametrelerden toprak bünyesi ve hacim ağırlığı, araştırmacıların kendilerinin de girebileceği gibi, programda da “Neural network prediction” kısmına girilerek de bulunabilir (Şekil 2e.). Bir sonraki adımda, üst ve alt sınır koşulları belirlenir. Örneğin, saksı ortamında yapılacak bir çalışmada, saksı üst kısmı açıkta üst sınır koşuluna atmosfer etkisinin olduğu (Atmospheric BC with Surface Layer) kısım seçilir. Alt sınır koşulu ise saksı ortamı için Seepage face veya arazi için free drainage seçenekleri seçilir (Şekil 2f.). Sonraki adımda, bitki köklerinin su alımına etkisi için iki şık mevcuttur (Şekil 2g.). Eğer Feddes seçilirse, bir sonraki adımda yetiştirilecek bitki materyaline göre ilgili parametreleri otomatik olarak model vermektedir (Şekil 2h.). Sonraki işlemde, Şekil 2c.'de 20 olarak seçilen değerlerin girilmesi gerekir. Öncelikle 6 gün olarak girilen sulama aralığı ve bir önceki gün olarak seçildiği için buradaki değerler 5 ile başlayıp 6, sonra 11 ve 12 olarak devam edecektir. Bir sağındaki sütunda yağış veya sulamadan gelen sulama suyu

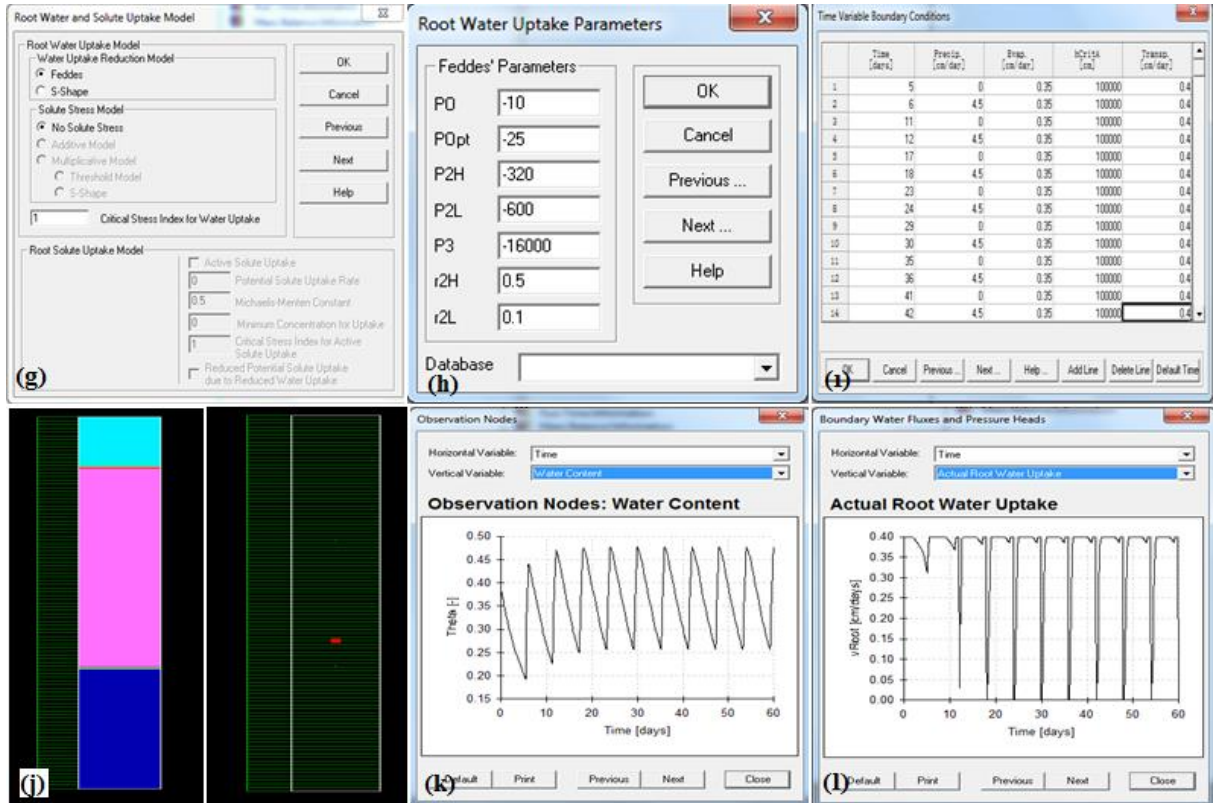
miktarı 6, 12 ve diğer günler için birim cm/gün olarak girilir. Programda, buharlaşma (evaporation) ve terleme (transpiration) değerleri ayrı ayrıdır ve bu değerlerin nasıl hesaplanacağı Eşitlik 4 ve 5'te açıklanmıştır (Şekil 2i.). Bir sonraki adımda, kök dağılımının bilinmesi gerekir. Bu örnekte, üç farklı kök dağılımı belirlenmiştir. Örneğin, 0–2 cm derinlik için 0,5, 2–10 cm için 1,0, 10–15 cm için 0,25 değeri seçilmiştir (Şekil 2j.). Aynı şekilde gözlem noktalarının belirlenmesi gerekir. Örnekte, yalnızca bir tane gözlem noktası işaretlenmiştir. Bu noktaların çokluğu araştırmacıya bağlıdır. Gözlem noktaları ne kadar çok olursa modelin verdiği sonuç da o kadar sağlıklı olmaktadır (Şekil 2j.). Tüm bu veriler programa girildikten sonra model çalıştırılır ve gözlem noktalarındaki girilen değerlere göre tahmin edilen nem değerlerinin değişimi elde edilir (Şekil 2k). Ayrıca kök su alımının da günlere göre değişimi de model tarafından tahmin edilir (Şekil 2l.).

Sonuç

HYDRUS programı toprak su hareketi ve mineral madde taşınımının yapıldığı modelleme programları arasında en yaygın olarak kullanılan bir programdır. Toprak profili içerisindeki su akışının HYDRUS programı ile belirlenmesi üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Buna rağmen, ülkemizde bu programın kullanımı yaygın değildir. Bu çalışma ile programın tanıtılması, işleyişi ve nasıl kullanılacağı kısaca özetlenmiştir. Ayrıca, ücretsiz olarak araştırmacıların ilgili siteden indirebileceği HYDRUS-1D programında yapılmış bir örnek çalışma verilmiştir. Sonuç olarak, yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, HYDRUS modelinin laboratuvar ve arazide yürütülen denemelerde, toprak nem değerlerini belirlemek amacıyla kullanılmasında oldukça faydalı olacağı söylenebilir.

Teşekkür: HYDRUS programının kullanımı konusunda desteği için Prof. Dr. Rüdiger ANLAUF'a (Hochschule Osnabrück University of Applied Sciences, Faculty of Agricultural Sciences and Landscape Architecture, Osnabrück, Germany) teşekkürü borç bilirim.





Şekil 2. HYDRUS-1D programında modelleme süreci.

Kaynaklar

- Ahnert, M., Blumensaat, F., Langergraber, G., Alex, J., Woerner, D., Frehmann, T., Halft, N., Hobus, I., Plattes, M., Sperring, V., Winkler, S., 2007. Goodness-of-fit measures for numerical modelling in urban water management—a summary to support practical applications. In: Proceedings 10th LWWTP Conference, 69–72. 9–13 September 2007, Vienna, Austria.
- Anlauf, R., Rehmann, P., Schacht, H., 2012. Simulation of water uptake and redistribution in growing media during ebb-and-flow irrigation. *Journal of Horticulture and Forestry*. 4 (1): 8–21.
- Belmans, C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* 63: 271–286.
- Blonquist, J.M., Jones, S.B., Robinson, D.A., 2006. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*. 84: 153–165.
- Bufon, V.B., Lascano, R.J., Bednarz, C., Booker, J.D., Gitz, D.C., 2012. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrig Sci*. 30: 259–273.
- Büyüктаş, D., Hakköğren, F., 2005. Batı Akdeniz tarımsal araştırma enstitüsü aksu birimi topraklarının toprak-su karakteristik eğrisi parametrelerinin belirlenmesi. *Akdeniz Üni. Ziraat Fak. Dergisi*. 18 (1): 101–106.
- Demirel, K., 2012. Toprak altına serilen su tutma bariyerlerinin (stb) toprak su içeriği ve çim bitkisi gelişimi üzerine etkileri. ÇOMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Anabilim Dalı, Doktora Tezi. 109 s.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Neuman, S.P., 1978. Simulation of field water use and crop yield, John Wiley, 189 p. New York.
- Legates, D.R., McCabe, G.J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35: 233–241.
- McCoy, E.L., McCoy, K.R., 2009. Simulation of putting-green soil water dynamics: implications for turfgrass water use. *Agricultural Water Management*. 96: 405–414.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513–522.
- Provenzano, G., 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 133 (4): 342–349.
- Ritchie, J.T., 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8: 1204–1213.



- Sejna, M., Simunek, J., 2007. HYDRUS (2D/3D): graphical user interface for the hydrus software package simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, published online at www.pc-progress.cz, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Simunek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.Th., 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, 202 p. Golden, Colorado,
- Simunek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.Th., 1999. The HYDRUS/2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 2.0, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Simunek, J., Köhne, J.M, Kodesova, R., Sejna, M., 2008a. Simulating nonequilibrium movement of water, solutes and particles using HYDRUS: A Review of Recent Applications. http://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/Simunek_et_al_Soil_and_Water_2008.pdf [01.01.2014].
- Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th., 2008b. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, 240 p. California, USA.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., Shouse, P.J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 130 (4): 304–310.
- Topp, G.C., 2003. State of the art measuring soil water content. *Hydrol. Process.* 17: 2993–2996.
- 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.
- Vrugt, J.A., Van Wijk, M.T., Hopmans, J.W., Simunek, J., 2001. One, two and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resources Research.* 37 (10): 2457–2470.
- Zhou, Q., Kang, S., Zhang, L., Li, F., 2007. Comparison of APRI and HYDRUS-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. *Plant Soil.* 291: 211–223.