

استفاده از نرم افزار HYDRUS در شبیه سازی حرکت و جذب آب در خاک و

ارائه نرم افزار SWMRUM

سینا بشارت^{1*}، امیرحسین ناظمی²، علی اشرف صدرالدینی³ و صداقت شهمراد⁴

تاریخ دریافت: 88/8/11 تاریخ پذیرش: 89/7/14

1- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

2-3- استاد و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

4- دانشیار، گروه ریاضی کاربردی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: sina323@yahoo.com

چکیده

مدل‌های عددی در شبیه سازی حرکت آب در خاک کاربرد فراوان دارند. این مدل‌ها نیازمند وارد کردن مدل جذب بوسیله سیستم ریشه در خاک می‌باشند. در این تحقیق دو مدل حرکت آب در خاک شامل مدل جدید ارائه شده (SWMRUM) و دیگری نرم افزار HYDRUS بر اساس اندازه گیری‌های صحرایی در باغ سیب مقایسه گردیدند. با استفاده از دستگاه رطوبت سنج TDR، درصد حجمی آب خاک در دو جهت شعاعی (R) و عمق (Z) اندازه گیری شد. مدل دو بعدی جذب آب توسط ریشه بر اساس تابع توزیع تراکم ریشه، تعرق پتانسیل، فاکتور تصحیح تنش آب و تعیین تأثیر ریشه در حرکت آب بسط داده شد. مدل حاصله با معادله جریان آب در خاک مبتنی بر حل معادله ریچاردز تلفیق گردید. نتایج شبیه سازی شده با داده‌های رطوبت خاک حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه و همبستگی قابل قبولی بین آن‌ها مشاهده شد. تحلیل خطای برآورد مدل که برابر تفاوت بین داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشد، با به کار گیری پارامترهای حداکثر خطا (ME)، ریشه مجذور میانگین خطا (RMSE)، ضریب تعیین (CD)، کارایی مدل (EF)، ضریب تجمعی باقیمانده (CRM)، تشریح و بر اساس این پارامترها تحلیل کاملی از مقایسه نتایج ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب حداکثر آب در حدود $0/04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ در عمق 25-30 سانتیمتری خاک و حداقل جذب در حدود $0/005 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ در عمق 80 سانتیمتر اتفاق می‌افتد.

واژه های کلیدی: تراکم ریشه، حرکت آب، حل عددی، معادله ریچاردز، نرم افزار SWMRUM

Applications of HYDRUS and the Proposed SWMRUM Software in Simulating Water Flow with Root Water Uptake Through Soils

S Besharat^{1*}, AH Nazemi², AA Sadraddini³ and S Shahmorad⁴

Received: 2 November 2009 Accepted: 6 October 2010

¹Asist Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Urmia, Iran

^{2,3}Prof. and Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

⁴Assoc. Prof., Dept. of Mathematics, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author: E-mail: sina323@yahoo.com

Abstract

Numerical models are frequently used for simulation of water movement in soils. Soil water flow simulation models require a description of root water uptake as a sink term. In this study, two water flow models including the proposed SWMRUM model and the HYDRUS software were compared based on the field measurement in an apple orchard. Probe-type time domain reflectometry (TDR) was used to measure soil volumetric water content within radial (R) and depth (Z) vectors. Root water uptake model includes root density distribution function, potential transpiration and soil water stress-modified factor. A root water uptake sink term was developed, and entered into a soil water dynamic model to enable simulation of water flow in soil via numerical solution of Richards equation. The outputs from the two models were compared against the measured water content data. Simulated and measured water contents were in excellent agreement. Analysis of residual errors, differences between the measured and simulated values, was performed to evaluate the model performance, based on the maximum error (ME), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (CD), modeling efficiency (EF), and coefficient of residual mass (CRM). Results showed that maximum root water uptake was $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ at 25-30 cm depth and the minimum was $0.005 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ at 80 cm depth.

Keywords: Numerical solution, Richards' equation, Root distribution, SWMRUM software, Water flow

در راستای این چالش نماید. شبیه سازی عددی راه حل موثر در بهینه سازی مدیریت آب در مزرعه می باشد (مشکات و همکاران 1999، شمیتس و همکاران 2002، کوت و همکاران 2003).

مقدمه

به علت رشد جمعیت جهان و محدودیت منابع آب، آبیاری در کشاورزی باید در جهت تولید محصول بیشتر با میزان آب کمتر حرکت کند. فهم حرکت آب در خاک و سازوکار جذب آب توسط ریشه می تواند کمک بسیاری

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفتند (عباسی و همکاران 2003a,b، وانگ و همکاران 2006). دانشمندان بسیاری الگوی پخش آب در خاک را اندازه‌گیری یا به صورت عددی در آبیاری زیر سطحی و سطحی شبیه‌سازی نموده‌اند (اسولینگ 2002، گاردناس و همکاران 2005، وانگ و همکاران 2006، لازارویچ و همکاران 2007). تعدادی از این محققین در شبیه سازی از نرم افزار HYDRUS استفاده کرده‌اند (اسکاگز و همکاران 2004، گاردناس و همکاران 2005، سیال و اسکاگز 2009). در بین آنها می‌توان به کارهای اسکاگز و همکاران در سال 2004 اشاره کرد که با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی آبیاری قطره‌ای همبستگی خوبی بین آنها بدست آوردند.

هدف از این تحقیق مقایسه مدل HYDRUS و مدل ارائه شده در شبیه سازی حرکت آب در خاک همراه با جذب ریشه برای درخت سیب بر اساس اندازه گیری‌های صحرائی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های میدانی: آزمایش‌های میدانی در یک باغ سیب واقع در حومه شهر ارومیه طراحی و در طول 12 هفته از اول تیر تا اواخر شهریور اجرا شد. با استفاده از دستگاه رطوبت سنج TDR (TRIME-FM) و بهره‌گیری از لوله‌های مخصوص دستگاه، درصد حجمی آب خاک در پنج فاصله شعاعی (R) از محور درخت و پنج عمق (Z) در سه مکان در اطراف درخت اندازه‌گیری شد. بافت خاک لومی رسی با هدایت هیدرولیکی پایین بود. مشخصات نگهداری آب در خاک و پخشیدگی با استفاده از دستگاه صفحات فشار¹ و هدایت هیدرولیکی اشباع و معادله نفوذ از طریق دستگاه پرماتر گلف² محاسبه گردید. درصد حجمی آب در خاک بلافاصله بعد از آبیاری سطحی در اطراف درخت هر 2 ساعت اندازه‌گیری شد.

شناخت دقیق جذب آب توسط ریشه می‌تواند در مدیریت بهتر سیستم‌های آبیاری کمک شایانی نماید. شناخت تأثیر سیستم ریشه گیاهان در حرکت آب و نمک می‌تواند در استفاده بهتر از مدل‌های شبیه سازی آب در خاک مفید باشد. چون اکثر مدل‌ها شامل پارامتر جذب ریشه به صورت مکانی و زمانی می‌باشند (کلاسنیتزر و هوپمن 1994، سیمونک و همکاران 1999، موسترز و بوتن 1999). مدل‌های گوناگونی برای جذب آب توسط ریشه توسط دانشمندان مختلف ارائه شده است (فدیس و همکاران 1976، مولز 1976، جارویس 1989، گاردنر 1991 و کانگ و همکاران 1994). این مدل‌ها بیشتر بر اساس مطالعات مکانی، توزیع ریشه مؤثر و راندمان جذب آب وابسته به پتانسیل آب در خاک ارائه شده‌اند. مدل‌های موجود بیشتر به صورت یک بعدی هستند (فدیس و همکاران 1976، مولز 1981، آسینگ و همکاران 1997، زو و همکاران 2002) به جز مدل‌های (کولهو و ار 1996 و 1999، ورات و همکاران 2001، گانگ و همکاران 2006) که به صورت دو بعدی ابداع شده‌اند. اما مدل‌های یک بعدی نمی‌توانند توزیع ریشه را به صورت شعاعی و عمودی در محیط ریشه درختان برآورد نمایند. در حقیقت، توزیع ریشه در باغ‌ها به علت لایه بندی خاک، توزیع مواد غذایی و آب و تراکم بعضی قسمت‌های خاک در اثر رفت و آمد و آبیاری بسیار ناهمگن می‌باشد (جونس و تاردیو 1998، گرین و کلوسیر 1998، زو و زنگ 2002). پس خاک ناهمگن و توزیع ریشه ناهمگن نیاز به مدل دو بعدی و سه بعدی انعطاف پذیر جهت شبیه سازی حرکت و جذب آب را در عمل دارد.

در سال‌های اخیر مدل‌های بسیاری برای شبیه سازی حرکت آب و نمک همراه با جذب ریشه در محیط غیر اشباع ارائه شده است که نرم افزار HYDRUS (سیمونک و همکاران 2006) یکی از با ارزش‌ترین مدل‌هایی است که در تحلیل و طراحی سیستم‌های آبیاری در کشاورزی استفاده می‌گردد. مدل HYDRUS در مطالعات فراوان آزمایشگاهی و مزرعه‌ای برای شبیه‌سازی و یا برآورد معکوس

¹Pressure plate, model SEC-15Bar

²Guelph permeameter, model 2800 KL

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه انتخاب گردید.

مدل ارائه شده¹ SWMRUM

مدل حرکت آب در خاک: با در نظر گرفتن جریان آب به صورت دو بعدی در محیط متخلخل غیر اشباع و با فرض ناچیز بودن نقش فاز هوا در جریان مایع، معادله حاکم، معادله ریچاردز اصلاح شده (سیمونک و همکاران 2006) انتخاب گردید.

مدل جذب آب: در مدل ارائه شده جذب، تاثیر تابع توزیع اولیه ریشه و بافت خاک به طور مستقیم آورده شده است که در مدل ورات و همکاران (2001b) و مدل‌های جذب ریشه محققین دیگر در نظر گرفته نشده است (گاردنر 1991، کانگ و همکاران 1994، کلهو و ار 1996). مدل‌های ارائه شده در این تحقیق بر اساس داده‌های مشاهداتی و بهینه کردن پارامترها بدست آمد، که از بین آنها دقیق‌ترین مدل انتخاب و در مدل عددی وارد شد.

مدل A: مدلی که در این قسمت ارائه می‌شود بر اساس مطالعه مدل‌های مختلف جذب ریشه بدست آمد و از پارامترهای ساده‌ای تشکیل شده است (آلن و همکاران 1998):

$$S(r, z, t, h) = \gamma(r, z, h) T_{pot} a_c(r, z) \quad [5]$$

که در آن $S(r, z, t, h)$ نشان دهنده جذب ریشه در مکان مشخص از خاک بر اساس بار فشار (h) در زمان t می‌باشد $[L^3L^{-3}T^{-1}]$ ، $\gamma(r, z, h)$ تابع تنش آب است که در ادامه در مورد آن بحث خواهد شد، T_{pot} شدت تعرق پتانسیل گیاه در واحد طول $[L^2T^{-1}]$ و $a_c(r, z)$ تابعی است که میزان تراکم ریشه در نقطه مورد نظر را نشان می‌دهد $[L^{-3}]$. تابع $a_c(r, z)$ به صورت زیر تعریف می‌شود (آلن و همکاران 1998):

$$a_c(r, z, t) = \frac{\beta(r, z, t)}{\iint \beta(r, z, t) drdz} \quad [6]$$

پروفیلی با عمق 1/5 متر در کنار تنه درخت حفر و نمونه‌هایی از خاک در مکانهای مختلف برداشت شد. تراکم طولی ریشه (cm/cm^3) هر نمونه بر اساس طول ریشه به حجم نمونه بدست آمد.

مدل HYDRUS

حرکت آب در خاک همراه با جذب ریشه بر اساس اطلاعات میدانی با استفاده از مدل HYDRUS دوبعدی (سیمونک و همکاران 2006) شبیه سازی شد. معادله حاکم برای جریان آب در خاک معادله دو بعدی ریچاردز می‌باشد:

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

که در آن θ درصد رطوبت حجمی $[L^3L^{-3}]$ ، h بار فشار آب در خاک $[L]$ ، t زمان $[T]$ ، K هدایت هیدرولیکی $[LT^{-1}]$ ، x جهت افقی و z جهت عمودی را نشان می‌دهند. همچنین S نشان دهنده مقدار جذب آب توسط ریشه از خاک می‌باشد $[L^3L^{-3}T^{-1}]$. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از رابطه ون گنوختن-معلم بدست آمد (ون گنوختن 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad [2]$$

$$K(h) = K_s S_e^L \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad [3]$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - 1/n \quad [4]$$

که در آن θ_s درصد آب خاک اشباع، θ_r درصد آب خاک باقیمانده، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، α معکوس مقدار ورود هوا در حالت اشباع و n و m پارامترهای وابسته به خاک هستند که با استفاده از برازش بر معادله مورد نظر بدست می‌آیند. مقادیر و واحد این پارامترها در جدول 1 ارائه شده است.

حوزه شبیه سازی جریان به فاصله 1/7 از محور درخت و عمق 1 متر شبکه بندی شد. اندازه شبکه بندی 0/03 متر در جهت شعاعی و 0/02 متر در جهت عمق که

¹Soil water movement and root uptake model

که با اندازه‌گیری‌های میدانی یا به صورت تخمینی مشخص می‌گردند.

مدل C: مدل دو بعدی ارائه شده در این قسمت برای جذب آب توسط ریشه، بر اساس بررسی مدل‌های پیچیده‌تر بدست آمد. در این مدل پارامترهای جدیدی وارد گردید که در مدل‌های قبلی مورد استفاده قرار نگرفته بود. یکی از این پارامترها، خواص فیزیکی خاک بود که در مدل ارائه شده توجه خاصی به آن شد:

$$\beta(r, z, t) = C_{ir} \left(1 - \frac{r}{r_m(t)}\right) \left(1 - \frac{z}{z_m(t)}\right) \times \beta_0 e^{(\rho(r/r_m(t)) + \tau(z/z_m(t)))} \quad [14]$$

که $\beta(r, z, t)$ تابع توزیع تراکم ریشه، C_{ir} ضریب قدرت رشد ریشه بدون بعد که با دستگاه پنترومتر ارزیابی گردید، t زمان مشخص $[T]$ ، r فاصله از محور درخت در جهت شعاعی $[L]$ ، z عمق $[L]$ ، $r_m(t)$ شعاع حداکثر توسعه ریشه $[L]$ در جهت شعاعی در زمان t ، $z_m(t)$ عمق حداکثر توسعه ریشه $[L]$ در جهت عمودی در زمان t و β_0 ، ρ و τ پارامترهای تجربی هستند که به ترتیب $0/3632$ ، $0/5925$ و $-0/7519$ cm^3/cm^3 تخمین زده شده‌اند. ضریب C_{ir} با اندازه گیری‌های انجام شده در مزرعه با استفاده از دستگاه پنترومتر بر اساس مقدار تراکم هر خاک به خاک شنی محاسبه شد که برای خاک لوم رسی در این تحقیق $0/6$ بدست آمد. در طول آزمایش، رشد ریشه بسیار محدود بود. بنابراین در پایان آزمایش‌ها تراکم ریشه اندازه‌گیری شد، حداکثر فاصله توسعه ریشه درخت در جهت‌های شعاعی و عمودی به ترتیب 150 و 100 سانتیمتر بود. بنابراین بر اساس رابطه 14 مدل ارائه شده شامل حداکثر 6 پارامتر است.

جذب ریشه پتانسیل برابر شدت تعرق پتانسیل (T_{pot}) بوده و توزیع مکانی و زمانی جذب ریشه حداکثر S_{max} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (سیمونک و همکاران 1999):

که در آن $\beta(r, z, t)$ تابع توزیع تراکم ریشه $[L^{-3}]$ ، t زمان مشخص $[T]$ ، r فاصله در جهت شعاعی $[L]$ ، z فاصله در عمق $[L]$ می‌باشد. $\beta(r, z, t)$ را می‌توان با استفاده از معادله‌های مختلف و بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرائی بدست آورد. یکی از معادله‌های ارائه شده در این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

$$\beta(r, z, t) = \beta_0 \exp(-\beta_1 z) \exp(-\beta_2 r) \quad [7]$$

که β_0 ، β_1 و β_2 پارامترهای ثابت تجربی هستند. بنابراین بر اساس معادله‌های 6 و 7 می‌توان نوشت:

$$a_c(r, z) = \lambda \exp(-\beta_1 z) \exp(-\beta_2 r) \quad [8]$$

$$\lambda = \frac{\beta_1 \beta_2}{[1 - \exp(-\beta_1 z_r)][1 - \exp(-\beta_2 r_r)]} \quad [9]$$

پارامترهای r_r و z_r رشد حداکثر ریشه در جهت شعاع (r) و عمق (z) را نشان می‌دهد که با اندازه‌گیری‌های میدانی یا به صورت تخمینی مشخص می‌گردند.

مدل B: مدل خطی و ساده‌ای نیز برای شبیه سازی جذب که پارامترهای آن به سادگی قابل محاسبه می‌باشد، بدست آمد. معادله جذب در این مدل همانند معادله 5 از تابع تنش، تعرق پتانسیل و تابع فعالیت ریشه تشکیل شده است. تابع فعالیت ریشه $a_c(r, z)$ نیز از معادله 6 قابل محاسبه است و $\beta(r, z, t)$ را به صورت معادله خطی زیر می‌توان محاسبه نمود (اسولینگ 2002):

$$\beta(r, z, t) = \beta_0 - \beta_1 z - \beta_2 r \quad [10]$$

که β_0 ، β_1 و β_2 پارامترهای ثابت تجربی می‌باشند. بنابراین بر اساس معادله‌های 6 و 10 می‌توان نوشت (اسولینگ 2002):

$$a_c(r, z) = \frac{c_1(2z - z_r) + c_2(2r - r_r) + z_r}{r_r z_r^2} \quad [11]$$

$$c_1 = -\frac{\beta_1 z_r}{2\beta_0 - \beta_1 z_r - \beta_2 r_r} \quad [12]$$

$$c_2 = -\frac{\beta_2 z_r}{2\beta_0 - \beta_1 z_r - \beta_2 r_r} \quad [13]$$

همانند معادله 9، پارامترهای r_r و z_r رشد حداکثر ریشه در جهت شعاعی (r) و عمق (z) را نشان می‌دهد

به ساختمان خاک بستگی دارد و در این مدل برابر $0/7$ به دست آمد. در شکل 1 مقادیر محاسبه شده تابع تنش آب بر اساس مدل ارائه شده و مدل ون گنوختن در رطوبت‌های مختلف ارائه شده است. بر اساس این شکل همبستگی خوبی بین این دو مدل مشاهده می‌شود.

در نهایت جذب آب توسط ریشه در r و z مشخص را می‌توان بر اساس محاسبات معادلات 14 تا 18 بدست آورد:

$$S(r, z, t, h) = \gamma(r, z, h) S_{\max}(r, z, t) \quad [19]$$

که در آن $S(r, z, t, h)$ نشان دهنده جذب ریشه در مکان مشخص از خاک برای بار فشاری (h) در زمان t می‌باشد. مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای جذب ریشه در جدول 2 آورده شده است. مدل جذب ریشه حاصله با مدل انتقال آب در خاک مبتنی بر حل معادله ریچاردز تلفیق و به صورت عددی حل شد.

پارامترهای ME (حداکثر خطا)، RMSE (ریشه مجذور میانگین خطا)، CD (ضریب تعیین)، EF (کارایی مدل)، CRM (ضریب تجمعی باقیمانده) در زیر همراه با تشریح روابط آن آورده شده‌اند (همایی 1999):

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad [20]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad [21]$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad [22]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [23]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [24]$$

در روابط بالا، P_i داده‌های تخمین زده شده، O_i داده‌های اندازه‌گیری شده یا مشاهده شده، \bar{O} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

$$S_{\max}(r, z, t) = \frac{R^2 \beta(r, z, t) T_{\text{pot}}}{2 \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad [15]$$

که در آن $S_{\max}(r, z, t)$ بیانگر شدت جذب حداکثر $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$ و R شعاع قسمت سایه انداز درخت $[L]$ می‌باشد.

تعرق پتانسیل به صورت تعرق حداکثر در حالتی که گیاه در شرایط بدون تنش آب باشد تعریف می‌گردد:

$$T_{\text{pot}} = K_c ET_0 - E_s \quad [16]$$

که K_c ضریب گیاهی بدون بعد، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع $[L^3 T^{-1}]$ و E_s بیانگر تبخیر از سطح خاک می‌باشد $[L^3 T^{-1}]$.

برای کاربرد $S(r, z, t)$ در معادله ریچاردز، ضریب اصلاحی بر اساس تابع تنش آب $\gamma(r, z, h)$ که به صورت زیر توسط ون گنوختن (1987) ارائه گردیده است در نظر گرفته می‌شود:

$$\gamma(r, z, h) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^p \right]} \quad [17]$$

h بار فشار آب در مکان مشخص (r, z) از خاک $[L]$ ، h_{50} بار فشار آب در خاک در حالتی که جذب آب توسط ریشه 50 درصد کاهش یابد. $[L]$ ، P پارامتر برازش که عموماً 3 در نظر گرفته می‌شود (ون گنوختن و گوپتا 1993). در این تحقیق تابع تنش جدیدی ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. در رابطه قبل محاسبه و اندازه‌گیری پارامترهای آن با مشکلاتی همراه است به همین دلیل تابع جدید و ساده‌تری که پارامترهای آن به سادگی در دسترس است استفاده شد. این تابع بر اساس داده‌های واقعی جذب آب ارزیابی و مورد تایید قرار گرفت که به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\gamma(r, z, h) = \left[\frac{K(h)}{K_s} \right]^p \quad [18]$$

که در آن $K(h)$ هدایت هیدرولیکی خاک در حالت غیر اشباع در پتانسیل مشخص $[LT^{-1}]$ ، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک $[LT^{-1}]$ و P پارامتر تجربی که

نتایج و بحث

اندازه‌گیری شده، مدل SWMRUM و نرم‌افزار HYDRUS یکسان می‌باشد.

جذب آب توسط ریشه: بر اساس مدل ارائه شده حرکت آب در خاک همراه با جذب ریشه SWMRUM مقدار واقعی جذب ریشه بدست آمد. مدل توسعه داده شده جذب ریشه بسیار انعطاف پذیر بوده و به صورت متغیر مکانی و زمانی جذب آب را شبیه سازی می‌نماید. با استفاده از پارامترهای بهینه شده معادلات جریان و جذب آب در خاک (جدول 1 و 2)، نتایج شبیه سازی شده در دوره آزمایش همبستگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری دارند. برای مقایسه مقدار جذب ریشه در خاک، داده‌های بدست آمده در طول 360 ساعت برای فواصل مشخص از درخت در عمق‌های مختلف تقسیم بندی و ارائه گردید (شکل 3). در این شکل جذب آب توسط ریشه به صورت گرافیکی با واحد $m^3 m^{-3} d^{-1}$ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و مدل‌های موجود در شکل 3 می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWMRUM برای جذب ریشه (معادله‌های 14 تا 19) شبیه سازی دقیق‌تری نسبت به معادله جذب ریشه (ورگت و همکاران 2001a و 2001b) در نرم افزار HYDRUS داشته است. چون در نرم افزار HYDRUS تاثیر تراکم خاک و مواد آلی در مزرعه در مشخصات خاک و پارامترهای ریشه در نظر گرفته نشده است. شکل نشان می‌دهد که میزان جذب ریشه حداکثر در حدود $0/04 m^3 m^{-3} d^{-1}$ است که در عمق 25-30 سانتیمتر از خاک اتفاق می‌افتد. جذب ریشه درخت محدود به عمق 80 سانتیمتر می‌شود که این نتایج متأثر از میزان تراکم ریشه در این نقاط است. با توجه به شکل 3 می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین جذب ریشه در فواصل شعاعی 0-45 و 45-75 سانتیمتر از درخت اتفاق می‌افتد و در فاصله شعاعی 75-105 سانتیمتر از درخت این میزان بسیار کاهش می‌یابد. با بررسی شکل 3 مشخص می‌گردد که پس از زمان 300 ساعت از شروع آبیاری مقدار جذب آب توسط ریشه کاهش محسوسی نموده و به مقدار $0/005 m^3 m^{-3} d^{-1}$ می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که در رطوبت خاک بالا که مقدار جذب حداکثر است ریشه‌های نزدیکتر به درخت فعالیت بیشتر

برای ارزیابی و مقایسه دو مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS از داده‌های اندازه‌گیری شده در باغ سیب استفاده شد. در این قسمت نتایج تغییرات رطوبت خاک و جذب آب توسط ریشه درخت بدست آمده از مدل SWMRUM با نتایج نرم افزار HYDRUS مقایسه گردید. همچنین دقت هر یک از مدل‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی بدست آمد.

جریان آب در خاک: بر اساس حل عددی معادله‌های حاکم در حرکت آب در خاک نتایج برای عمق‌های مختلف و فواصل مختلف در خاک شبیه سازی شد. پارامترهای بهینه سازی شده که در حل معادله‌های استفاده شد در جدول 2 آورده شده است. در همین دوره با استفاده از نرم افزار HYDRUS حرکت رطوبت خاک بدست آمد. این نتایج برای دوره زمانی 360 ساعت انتخاب گردید. برای مقایسه بهتر، اطلاعات بدست آمده، در فواصل شعاعی 0-45، 45-75، 75-105، 105-135 و 135-165 تقسیم بندی شد.

نتایج حرکت رطوبت در شکل 2 آورده شده است. در این شکل نتایج رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR برای سری دوم لوله‌ها در مزرعه، مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS در کنار هم برای فواصل شعاعی و عمق‌های مختلف خاک رسم گردیده است. با توجه به شکل 2 می‌توان نتیجه گرفت که همخوانی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از مدل و نرم‌افزار وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که در نقاطی که تغییرات ناگهانی رطوبت وجود دارد مدل SWMRUM برآورد بهتری نسبت به نرم افزار HYDRUS انجام می‌دهد. بر اساس شکل‌های رسم شده مشخص گردید که تغییرات رطوبت خاک از حدود 36 درصد تا 16 درصد می‌باشد. کاهش رطوبت تا عمق 40 سانتیمتر از سطح خاک در طول 360 ساعت بیشتر از نقاط دیگر بوده و کاهش رطوبت با افزایش شعاع، کاهش پیدا کرده است. این مطلب بیانگر خروج رطوبت به صورت جذب ریشه می‌باشد که در نتایج

نرم‌افزارهای HYDRUS و SWMRUM به ترتیب در شعاع‌های 45-75 و 105-135 سانتیمتر بوده است. RMSE محاسبه شده در جداول مذکور نیز حاکی از آن است که مقدار تخمین رطوبت خاک با نرم افزار SWMRUM دقیق‌تر از نرم‌افزار HYDRUS بوده و میزان RMSE های بدست آمده برای نرم‌افزار SWMRUM کمتر از HYDRUS و به صفر نزدیکتر است. در مورد پارامتر CD نیز نتایج جداول نشان می‌دهند که داده‌های مربوط به نرم‌افزار SWMRUM نسبت به نرم‌افزار HYDRUS به یک نزدیکتر هستند، لذا این پارامتر نیز تاییدی بر عملکرد بهتر نرم‌افزار SWMRUM می‌باشد. همانطور که بیان شد مقدار منفی EF در مکان‌های مختلف (فاصله و عمق)، نشان دهنده این است که استفاده از داده‌های شبیه سازی در آن قسمت بایستی با دقت بیشتری انجام گیرد. حال با توجه به جداول 3 و 4، در هر دو نرم‌افزار، EF منفی وجود دارد با تفاوت اینکه تعداد EF های منفی در نرم‌افزار SWMRUM کمتر از تعداد EF های منفی در نرم‌افزار HYDRUS است و اعداد منفی EF در مدل SWMRUM به صفر نزدیکتر می‌باشد. با توجه به جدول 3 می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر منفی در نرم‌افزار HYDRUS بالا بوده و دقت شبیه سازی در فاصله شعاعی 135-165 بسیار پایین است. اعداد مربوط به پارامتر CRM در نرم‌افزار SWMRUM نسبت به نرم‌افزار HYDRUS به صفر نزدیکتر هستند، یعنی نرم‌افزار SWMRUM گرایش کمتری نسبت به تخمین‌های بالا و پایین دارد. از طرفی نرم‌افزار HYDRUS در نیمی از موارد گرایش به تخمین بالاتری نسبت میزان واقعی داده‌ها دارد به عبارت دیگر گرایش این نرم‌افزار به تخمین بالا و پایین به یک اندازه است. در نرم‌افزار SWMRUM و HYDRUS در شعاع‌های 0-45 و 75-105 تخمین بالا نداشته و بیشترین گرایش در تخمین بالا برای نرم‌افزار HYDRUS مربوط به شعاع 45-75 می‌باشد.

در نهایت مقایسه نکوئی برآزش بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده برای فواصل

دارند و برعکس در رطوبت خاک کم جذب ریشه در ریشه‌های دورتر از تنه درخت مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.

در شکل 4 مقدار کل جذب ریشه در دوره زمانی 15 روزه در فواصل مشخص در عمق‌های مختلف ارائه شده است. در این شکل برای ارزیابی نتایج جذب آب توسط ریشه مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS با استفاده از داده‌های مشاهداتی در کنار هم رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج جذب مدل SWMRUM در بیشتر نقاط همخوانی بهتری نسبت به نرم افزار HYDRUS دارد. بر اساس شکل 4 نرم افزار HYDRUS در فواصل کمتر (0-75cm) شبیه‌سازی بهتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر جذب آب توسط ریشه درخت سیب در عمق 25 سانتیمتری خاک اتفاق می‌افتد که مقدار آن حدود $0/20 \text{ (m}^3\text{m}^{-3}\text{)}$ در دوره 15 روزه می‌باشد. که این مقدار برای فواصل بیشتر از درخت به $0/10 \text{ (m}^3\text{m}^{-3}\text{)}$ کاهش یافته است.

تحلیل باقیمانده خطاها که بر اساس تفاوت بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشد، می‌تواند برای ارزیابی مدل استفاده شود.

در جداول 3 و 4 مقادیر پنج پارامتر آماری مربوط به دقت برآورد مدل‌ها به ترتیب برای نرم افزارهای HYDRUS و SWMRUM بر اساس عمق و شعاع‌های مختلف آورده شده است. نتایج در هر عمق و شعاع بر اساس میانگین کل زمان‌ها در عمق و شعاع مربوطه می‌باشد. در جداول 3 و 4، ME که نشان دهنده حداکثر خطا است، در اغلب موارد (به جز عمق 20 در شعاع 45-75 سانتیمتر، عمق 60 در شعاع 105-75 سانتیمتر و عمق 40 و 60 در شعاع 105-135 سانتیمتر) مقادیر ME در نرم افزار SWMRUM کمتر بوده که موارد استثنا را به دلیل پیروی نکردن از الگوی خاص می‌توان نادیده گرفت. لذا با توجه به این پارامتر نرم افزار SWMRUM میزان خطای کمتری را نسبت به HYDRUS نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر ME ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که بهترین شبیه سازی در

می دهد که هر دو مدل در شبیه سازی حرکت آب و جذب ریشه از دقت بالایی برخوردار می باشند. بر اساس نتایج می توان بیان کرد که نتایج مدل ارائه شده SWMRUM نسبت به نرم افزار معتبر و جدید HYDRUS (سیمونک و همکاران 2006) دقت بالاتری دارد. نتایج بیانگر این مطلب است که حدود 600-700 لیتر آب از قسمت بالایی محیط ریشه در مدت 14 روز جذب شده است. بنابراین به طور متوسط میزان جذب آب توسط ریشه درخت سیب در عمق 0-40 سانتیمتر از محیط ریشه 40-50 لیتر در روز محاسبه شد. این نتایج با گزارش های ارائه شده برای درخت گلابی (کاسپری و همکاران 1993) و درخت بالغ سیب (گرین و کلو سیر 1998) همخوانی دارد.

نتایج نشان می دهد که در نقاطی که تغییرات ناگهانی رطوبت وجود دارد مدل SWMRUM شبیه سازی بهتری نسبت به نرم افزار HYDRUS انجام می دهد و در زمان های طولانی دقت نرم افزار HYDRUS کاهش یافته است و می توان جهت افزایش دقت نرم افزار، مراحل شبیه سازی را به بازه های زمانی کوچکتر تقسیم نمود.

مختلف از تنه درخت در شکل 5 ارائه گردیده است. در این شکل نتایج شبیه سازی نرم افزار HYDRUS و مدل SWMRUM به صورت جداگانه رسم شده است. همانطور که در شکل مشخص است نتایج مدل SWMRUM با ضریب رگرسیون 0/95 نتایج بهتری را نسبت به نرم افزار HYDRUS نشان می دهد.

نتیجه گیری

مدل های یک بعدی ارائه شده توسط دانشمندان در شبیه سازی جذب و حرکت آب در خاک خصوصا برای درختان از دقت کافی برخوردار نیستند (فدیس 1976، مولز 1976، جارویس 1989). همچنین در بسیاری از تحقیقات انجام شده در انتقال آب و جذب ریشه، گیاهان یکساله مورد مطالعه قرار گرفته و تحقیقات بسیار محدودی در رابطه با درختان انجام گرفته است (جارویس 1989، کلهو و ار 1996، زو و زنگ 2002). در این تحقیق یک مدل جذب آب ریشه دو بعدی برای درخت سیب بسط داده شد. مدل دوبعدی ارائه شده قابلیت محاسبه جذب آب توسط ریشه را به صورت زمانی و مکانی بر اساس الگوی پخش یکنواخت و غیر یکنواخت آب در خاک را دارد. مدل برای حرکت آب و جذب توسط ریشه در خاک توسط اندازه گیری های صحرائی در باغ سیب تأیید شد. نتایج بدست آمده نشان

جدول 1- پارامترهای مشخصه های هیدرولیکی خاک.

منحنی مشخصه خاک						عمق خاک (cm)
K_s (cm/day)	L(-)	n(-)	α (1/cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	
10/00	0/50	1/36	0/01	0/46	0/09	0-100
12/00	0/50	1/49	0/01	0/46	0/09	50-100

جدول 2- پارامترهای مدل جذب آب توسط ریشه، استفاده شده در مدل عددی.

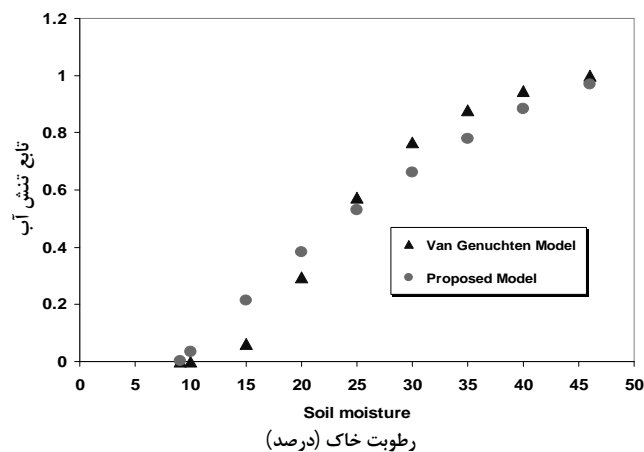
h_{50} (cm)	z_m (cm)	r_m (cm)	τ (cm/cm ³)	ρ (cm/cm ³)	C_{ir} (-)	β_0 (cm/cm ³)	
10/00	0/10	0/10	-0/20	0/20	0/02	0/18	حداقل
5000/00	1/20	2/00	-4/00	4/00	0/80	0/88	حداکثر

جدول 3- نتایج تحلیل آماری نرم افزار HYDRUS نسبت به شعاع و عمق.

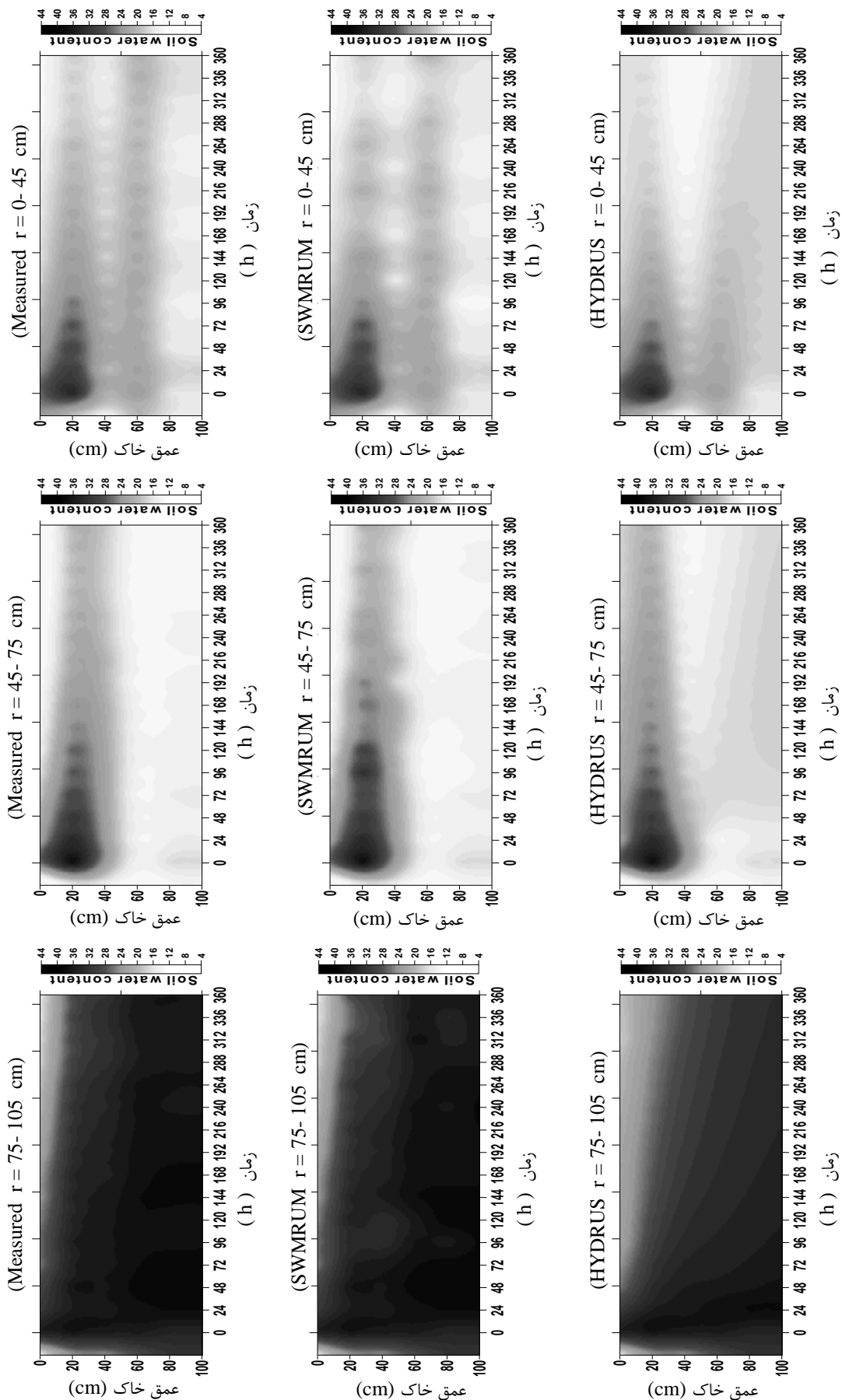
CRM	EF	CD	RMSE	ME (cm ³ /cm ³)	عمق (cm)	شعاع (cm)
-0/0831	0/7479	1/5504	0/1289	4/14	0	0-45
0/0796	0/8256	0/7211	0/0857	2/66	20	
0/1737	-1/6855	0/2080	0/1927	4/67	40	
0/1341	-12/6280	0/0569	0/1570	6/13	60	
-0/1421	-6/9018	0/1516	0/1596	3/51	80	
-0/1490	-7/3567	0/1389	0/1642	3/46	100	
-0/4226	-0/5172	0/6633	0/4658	8/72	0	45-75
-0/0287	0/9531	1/2384	0/0460	1/99	20	
0/2144	-6/6719	0/0971	0/2345	6/14	40	
-0/2444	-21/5269	0/0450	0/2636	4/19	60	
-0/2027	-8/0522	0/1267	0/2221	4/05	80	
-0/2344	-11/2754	0/0942	0/2586	4/84	100	
0/0224	0/8466	1/4515	0/0934	4/27	0	75-105
0/1385	-2/9729	0/1767	0/1499	6/42	20	
0/0791	-2/5201	0/1839	0/0884	4/25	40	
0/1025	-21/2959	0/0425	0/1113	5/44	60	
0/0807	-6/1283	0/1329	0/0878	4/29	80	
0/0642	-3/5906	0/1978	0/0704	3/77	100	
0/0668	0/6833	1/0561	0/1056	4/57	0	105-135
-0/1157	0/0833	1/0796	0/1381	5/38	20	
-0/0231	0/6435	1/5836	0/0467	2/82	40	
-0/0170	0/2728	2/2553	0/0366	2/11	60	
0/0455	-2/7916	0/2609	0/0509	2/85	80	
0/0310	-0/9419	0/5184	0/0364	2/31	100	
0/1634	-0/4693	0/3633	0/1831	7/48	0	135-165
0/0704	-0/1865	0/5346	0/0816	3/93	20	
-0/1942	-16/7564	0/0614	0/2168	7/28	40	
-0/1623	-24/5333	0/0436	0/1798	7/28	60	
-0/0860	-27/2213	0/0338	0/0982	4/27	80	
-0/1021	-37/7052	0/0247	0/1150	4/85	100	

جدول 4- نتایج تحلیل آماری نرم افزار SWMRUM نسبت به شعاع و عمق.

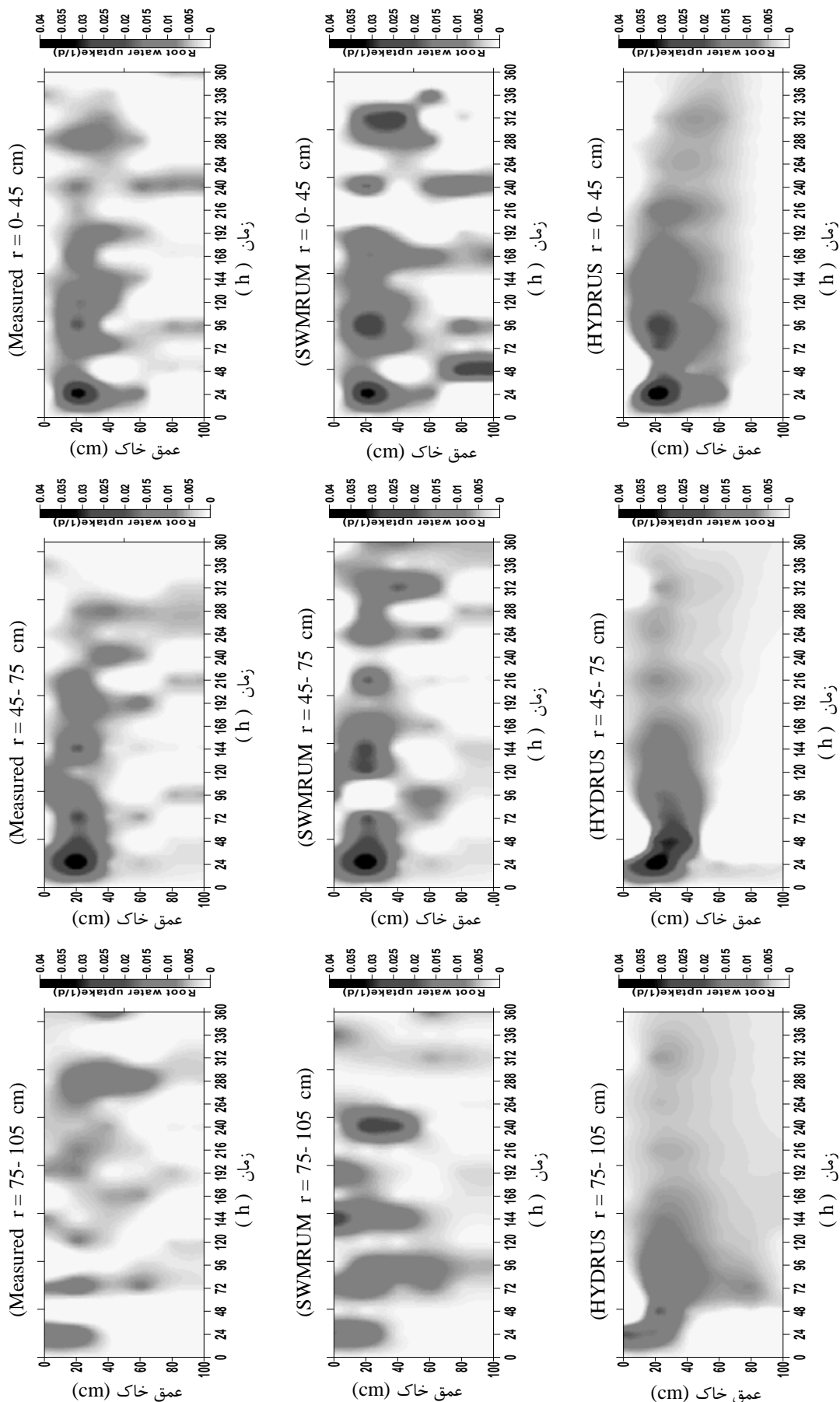
CRM	EF	CD	RMSE	ME (cm ³ /cm ³)	عمق (cm)	شعاع (cm)
0/0023	0/9838	0/9293	0/0327	1/12	0	0-45
0/0271	0/9664	1/0154	0/0377	2/23	20	
0/0295	0/7893	1/1251	0/0540	2/42	40	
0/0204	0/0827	0/9877	0/0407	2/37	60	
0/0331	-0/0733	0/7319	0/0588	2/82	80	
0/0252	0/0940	0/8854	0/0541	2/96	100	
0/0059	0/9926	1/1043	0/0324	1/10	0	45-75
-0/0404	0/8459	1/0205	0/0834	4/50	20	
0/0095	0/6428	0/9055	0/0506	2/30	40	
0/0852	-2/7883	0/3104	0/1080	1/85	60	
0/0094	-0/1299	1/5484	0/0785	1/20	80	
-0/0018	0/3542	1/4056	0/0593	0/90	100	
0/0147	0/9831	1/1283	0/0310	1/30	0	75-105
0/0171	0/5632	1/4345	0/0497	2/49	20	
0/0224	0/1897	0/8778	0/0424	2/12	40	
0/0140	-9/4243	0/1153	0/0761	5/92	60	
0/0008	-0/6189	0/5010	0/0418	2/30	80	
-0/0014	-0/1584	0/7510	0/0354	2/30	100	
0/0100	0/9414	1/1897	0/0454	1/90	0	105-135
0/0009	0/6790	1/1498	0/0818	3/46	20	
0/0127	0/3107	0/6598	0/0649	4/70	40	
0/0318	-0/6273	0/4883	0/0548	3/37	60	
-0/0014	-0/7603	0/7536	0/0347	1/50	80	
-0/0002	-1/0094	0/6918	0/0370	1/50	100	
0/0163	0/9509	1/0782	0/0335	2/30	0	135-165
-0/0249	0/3388	1/4863	0/0609	2/60	20	
-0/0046	-0/2951	1/2172	0/0586	2/20	40	
0/0047	-1/0296	0/9646	0/0507	2/30	60	
0/0034	-1/1286	0/7685	0/0270	1/10	80	
0/0102	-1/7135	0/3405	0/0304	2/30	100	



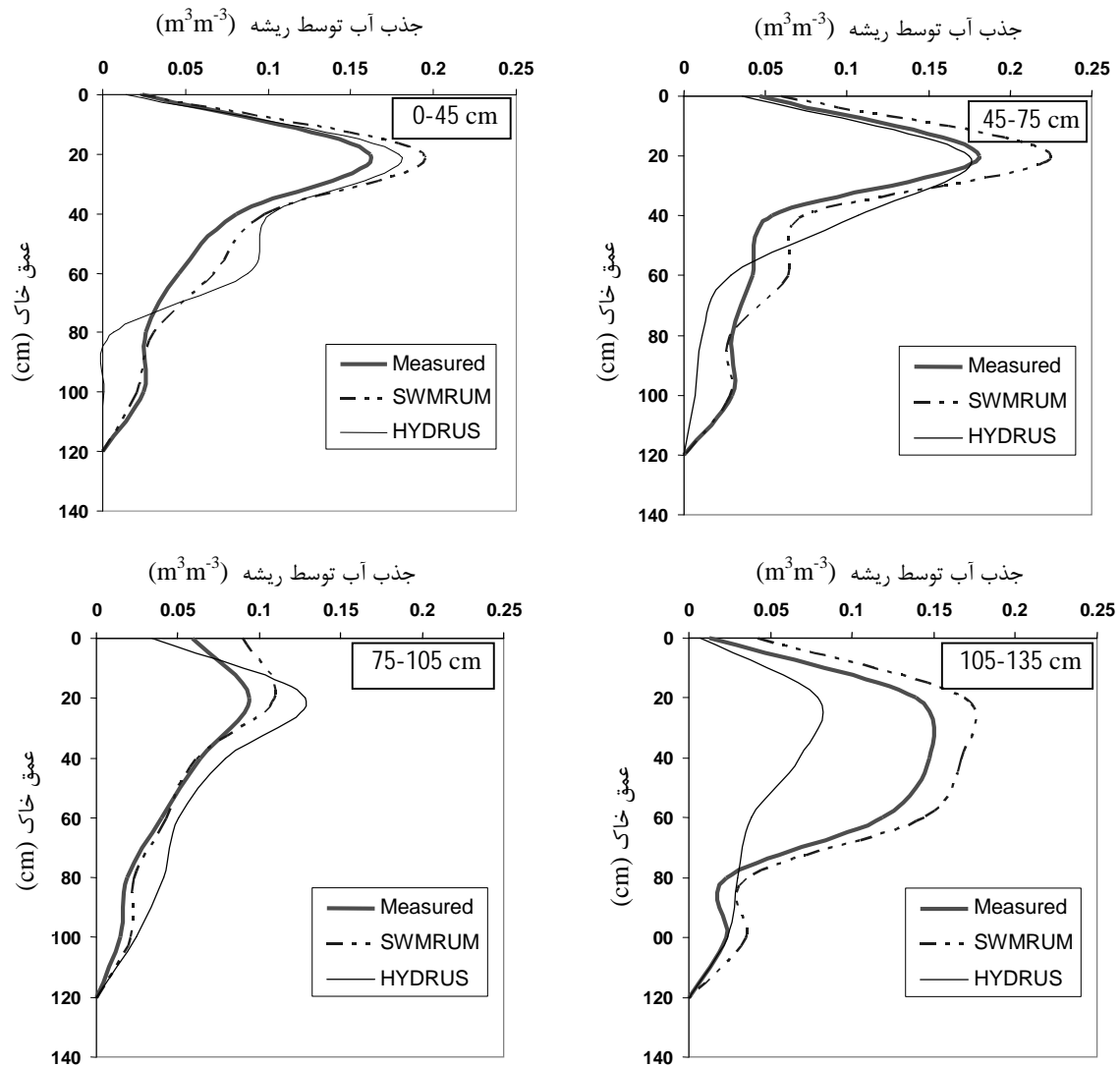
شکل 1- تغییرات تابع تنش آب در رطوبت‌های مختلف بر اساس مدل ون‌گنوختن و مدل ارائه شده.



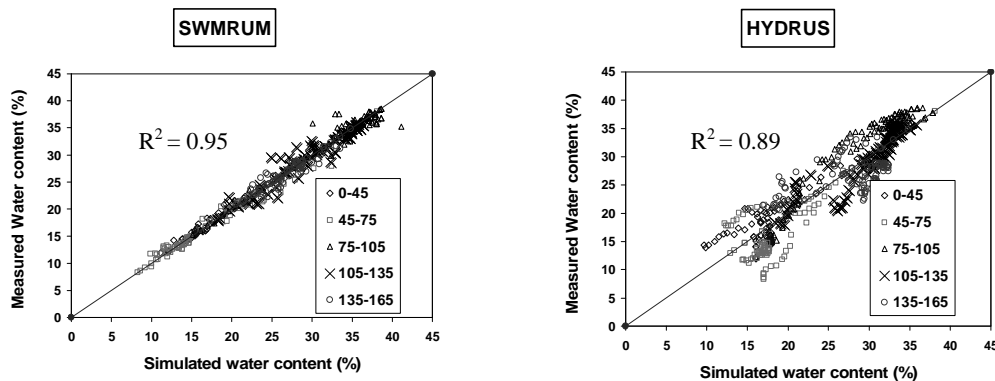
شکل 2- مقایسه بین داده‌های درصد رطوبت حجمی خاک اندازه گیری شده، مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS برای فواصل مشخص از درخت در طول دوره زمانی 360 ساعت پس از آبیاری



شکل 3- مقایسه بین نتایج جذب آب توسط ریشه (1/d) اندازه گیری شده، مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS برای فواصل مشخص از درخت در طول دوره زمانی 360 ساعت پس از آبیاری



شکل 4- نتایج کل جذب آب توسط ریشه اندازه گیری شده، مدل SWMRUM و نرم افزار HYDRUS برای فواصل مشخص از درخت نسبت به عمق خاک در دوره 15 روزه پس از آبیاری



شکل 5- نکونی برازش مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده دو بعدی رطوبت خاک در اطراف درخت سیب با استفاده از نرم افزار

HYDRUS و مدل SWMRUM

منابع مورد استفاده

- Abbasi F, Jacques D, Simunek J, Feyen J and van Genuchten MTh, 2003a. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: heterogeneous soil. *Trans ASAE* 46 (4): 1097–1111.
- Abbasi F, Simunek J, van Genuchten MTh, Feyen J, Adamsen FJ, Hunsaker DJ, Strelkoff TS and Shouse P, 2003b. Overland water flow and solute transport: model development and field data analysis. *J Irrig Drain Eng* 129 (2): 71–81.
- Allen R, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements* FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- Asseng S, Richter C and Wessolek G, 1997. Modeling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. *Plant and Soil* 190: 267–277.
- Assouline S, 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Sci Soc Am J* 66: 1630–1636.
- Caspari HW, Green SR and Edwards WRN, 1993. Transpiration of well-watered and water stressed Asian pear trees as determined by lysimeter, heat pulse, and estimated by a Penman–Monteith model. *Agric Forest Meteorol* 67: 13–27.
- Clausnitzer V and Hopmans JW, 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant Soil* 164: 299–314.
- Coelho FE and Or D, 1996. A parametric model for two dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Sci Soc Am J* 60: 1039–1049.
- Coelho EF and Or D, 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil* 206: 123–136.
- Cote CM, Bristow KL, Charleworth PB and Cook FJ, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. *J Irrig Drain Eng* 22(3-4):143-156.
- Feddes RA, Kowalik P, Kolinska-Malinka K and Zaradny H, 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *J Hydrol* 31:13–26.
- Gardenas A, Hopmans JW, Hanson BR and Simunek J, 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agric Water Manage* 74: 219–42.
- Gardner WR, 1991. Modeling water uptake by roots. *Irrigation Sci.* 12: 109–114.
- Gong D, Kang S, Zhang L, Du T and Yao L, 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. *Agric Water Manage* 83: 119 – 129.
- Green SR and Clothier BE, 1998. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil* 206 (1): 61–77.

- Homae M, 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. thesis. Agricultural University Wageningen, the Netherlands.
- Jarvis NJ, 1989. A simple empirical model of root uptake. *J Hydrol* 107: 57–72.
- Jones HG and Tardieu F, 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Sci Hort* 74: 21–46.
- Kang SZ, Liu XM and Xiong YZ, 1994. Theory of water transport in the soil-plant atmosphere continuum and its application. Pp: 147–149. China Water Resources and Hydro-Power Publication House, Beijing, (in Chinese).
- Lazarovitch N, Warrick AW, Furman A and Simunek J, 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. *Vadose Zone J* 6: 116–123.
- Meshkat M, Warner RC and Workman SR, 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. *J Irrig Drain Eng* 125(6): 315-323.
- Molz FJ, 1976. Water transport in soil-root system: transient analysis. *Water Resour Res* 12: 805-808.
- Molz FJ, 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water Resour Res* 17: 1245–1260.
- Musters PAD and Bouten W, 1999. Assessing rooting depth of an Austrian pine stand by inverse modeling soil water content maps. *Water Resour Res* 35:3041-3048.
- Schmitz GH, Shutze N and Petersohn U, 2002. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *J Irrig Drain Eng* 128(5): 287-297.
- Simunek J, Sejna M and van Genuchten MTh, 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53 International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Simunek J, Sejna M and Van Genuchten MTh, 2006. The HYDRUS software package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, User Manual Version 1.0, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Siyal AA and Skaggs TH, 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agric Water Manage* 96: 893–904.
- Skaggs TH, Trout J, Simunek J and Shouse, 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *J Irrig Drain Eng* 130: 304-310.
- van Genuchten MTh, 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J* 44: 892–898.
- van Genuchten MTh, 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res Rep 121, U S Salinity Lab. ARS USDA, Riverside, CA.

- van Genuchten MTh and Gupta SK, 1993. A reassessment of the crop tolerance response function. *Indian Soc Soil Sci* 4: 730–737.
- Vrugt JA, Wijk MT, Hopmans JW and Simunek J, 2001a. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resour* 2457–2470.
- Vrugt JA, Hopmans JW and Simunek J, 2001b. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sc Soc Am J* 65: 1027–1037.
- Wang FX, Kang Y and Liu SP, 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. *Agric Water Manag* 79: 248–264.
- Zuo Q and Zhang R, 2002. Estimating root-water-uptake using an inverse method. *Soil Sci* 169: 561–571.