

کاربرد و مقایسه توابع انتقالی پارامتریک مدل ون گنوختن در شبیه‌سازی جریان غیرماندگار آب در خاک کشت شده

صنم جعفری گیلانده^{1*}، حبیب خداوردیلو²، علی رسول‌زاده³

تاریخ دریافت: 93/11/11 تاریخ پذیرش: 94/12/10

¹دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

²دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

³دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: jafarisanam@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از توابع انتقالی به‌عنوان راهکاری که ویژگی‌های هیدرولیکی را از پارامترهای زودپیافت خاک برآورد کند، موردتوجه قرار گرفته است. در این پژوهش، منحنی رطوبتی یک خاک لومرسی به‌وسیله برخی از توابع انتقالی محلی و بین‌المللی برآورد گردید. منحنی رطوبتی خاک با روش مستقیم در آزمایشگاه اندازه‌گیری و اعتبار توابع انتقالی مورد مطالعه برای برآورد منحنی مذکور بررسی گردید. با واردکردن منحنی رطوبتی برآورد شده و اندازه‌گیری شده به مدل هایدروس یک‌بعدی، جریان آب در این خاک شبیه‌سازی و دقت کاربردی توابع انتقالی از نظر شبیه‌سازی جریان آب در خاک به‌طور کمی مقایسه شد. نتایج نشان داد بهترین توابع انتقالی در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی خاک مورد مطالعه برای عمق 15 سانتی‌متر، به‌ترتیب تابع سپاسخواه (Sepas)، توابع نوع اول و دوم یعقوبی (Y-(2), Y-(1)) و تابع دوم قربانی (Gh-(2)) با میانگین جذر مربعات خطای نرمال (NRMSE) کمتر از 0/1 می‌باشند. مقدار NRMSE منحنی رطوبتی خاک زیرسطحی، برای بیشتر توابع انتقالی بین‌المللی کمتر از 0/3 و برای بیشتر توابع انتقالی محلی کمتر از 0/2 برآورد گردید. مقدار NRMSE، شبیه‌سازی تغییرات رطوبت نسبت به زمان توسط هایدروس، با به‌کارگیری توابع انتقالی مختلف در خاک سطحی و زیرسطحی بین 0/07 تا 0/84 برآورد گردید. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در ارزیابی اعتبار توابع انتقالی باید به نوع کاربردی که قرار است از آن‌ها استفاده گردد توجه شود.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، جریان آب خاک، خصوصیات هیدرولیکی خاک، Hydrus-1D

Application and Comparison of Parametric Pedotransfer Functions of van Genuchten Model for Transient Water Flow Simulation in a Cultivated Soil

S Jafari Ghilandeh^{1*}, H Khodaverdiloo², A Rasoulzadeh³

Received: 31 January 2015 Accepted: 29 February 2016

1-M.Sc Graduated, Dept. of Soil Science, Urmia University, Iran

2- Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Urmia Univ. Urmia, Iran

3- Assoc. Prof., Dept. of Water Eng, Mohaghegh Ardabili Univ. Ardabil, Iran

*Corresponding Author, Email: Jafarisanam@ymail.com

Abstract

In recent years, using pedotransfer functions (PTFs) has been considered as a way to estimate the hydraulic properties of soil from easily to measured parameters. In this research, soil water retention curve of a clay loam soil was estimated using some of the global and regional PTFs. Soil water retention curve (SWRC) was constructed using direct measuring methods in laboratory and the validation of PTFs for estimation of the mentioned curve was evaluated. By entering the measured and estimated SWRC to Hydrus-1D, soil water flow was simulated and the accuracy of the PTFs for simulation of water flow was quantitatively compared. The results showed that the functions of Sepaskhah (Sepas), Yaghubi-1(Y-1), Yaghubi-2(Y-2) and Ghorbani-2(Gh-(2)) with normalized root mean square error (NRMSE) values of less than 0.1 could reasonably predict SWRC of the surface soil. In prediction of SWRC of subsurface soil, the NRMSE values of most global PTFs were less than 0.3 and for most of the regional PTFs were less than 0.2. NRMSE values in simulation of water content of surface and subsurface soils using Hydrus by applying different PTFs were between 0.07 to 0.84, respectively. It can be concluded that in running validating phase one should consider the objective for which the PTFs may be applied.

Keywords: Hydrus-1D, Pedotransfer functions, Soil hydraulic properties, Soil water flow

مقدمه

خاک، منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع هستند (یعقوبی و رسولزاده 1388). توابع انتقالی (PTFs) را می‌توان با مجموعه داده‌هایی با مقیاس‌های گوناگون از جمله منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی ایجاد کرد. برخی از توابع انتقالی بین‌المللی مثل رزتا¹ و سویل‌پار² کاربرد گسترده یافته‌اند. با این حال عموماً PTFs ابزاری برای درون‌یابی هستند و برای منطقه‌ای که در آن ایجاد

منطقه غیراشباع خاک به‌عنوان محیطی متخلخل، انتقال آب و مواد (آلاینده‌ها) را کنترل می‌کند و در مطالعات خاک اهمیت ویژه‌ای دارد. بنابراین انجام پژوهش‌هایی بنیادی درباره‌ی منطقه غیراشباع خاک ضروری است. افزون بر این، منطقه غیراشباع خاک، عرصه‌ی فعالیت‌های کشاورزی و رشد گیاه بوده و در بخش کشاورزی نیز اهمیت فراوانی دارد.

جریان غیراشباع آب در خاک اهمیت زیادی در مسائل آبیاری و زهکشی، هیدرولوژی و حرکت املاح در خاک دارد. از ویژگی‌های مهم در بخش غیراشباع

1 - Rosetta

2 - Soilpar

بعد از آبیاری افزایش می‌یابد، شاخه جذبی به فیزیک مسئله نزدیک‌تر است. مقایسه منحنی رطوبتی برآورد شده، با منحنی اندازه‌گیری شده ممکن است نتیجه مناسبی در پی داشته باشد ولی به‌علت پدیده پس‌ماند، حرکت آب و املاح را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نکند (جعفری و همکاران 1392). لذا در این پژوهش، افزون - بر ارزیابی دقت توابع انتقالی مختلف در برآورد منحنی رطوبتی، کارآمدی برآوردهای حاصل از برخی توابع انتقالی با مدل ون گنوختن، با مقیاس منطقه‌ای و بین-المللی در مدل کردن تغییرات رطوبت در خاک به‌وسیله نرم‌افزار هایدروس-یک بعدی بررسی گردید و توابع انتقالی برتر برای برآورد منحنی رطوبتی و شبیه‌سازی جریان آب در خاک مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در یک زمین زراعی، واقع در روستای آق‌بلاق استان اردبیل که تحت کشت سیب‌زمینی بود، انجام گردید. تغییرات رطوبت به مدت 53 روز (7 مرداد تا 28 شهریور) و به صورت 3 بار در هفته اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها از سه عمق 15، 45 و 75 سانتی‌متر (که به ترتیب معرف اعماق صفر تا 30، 30 تا 60 و 60 تا 90 سانتی‌متری بود)، در ماه‌های مرداد و شهریور صورت گرفت. بارندگی در این ماه‌ها طبق آمار هواشناسی به ترتیب $3/3$ و $3/53$ میلی‌متر بود. به علت قرار گرفتن زمان اندازه‌گیری در انتهای فصل رشد، آبیاری فقط در ماه مرداد و به میزان 26 میلی‌متر انجام گرفت. اطلاعات هواشناسی ماه‌های یادشده، مربوط به سال 1391 بوده که در جدول 1 ارائه شده است. برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری رطوبت خاک در روزهای مختلف از یک مته لوله‌ای استفاده شد. رطوبت خاک داخل مته به تفکیک عمق با خشک‌کردن در آون اندازه‌گیری و تغییرات زمانی رطوبت در عمق‌های مختلف به دست آمد.

شده‌اند نتایج بهتری ارائه می‌دهند (جعفری و همکاران 1392). نمس و همکاران (2003) از سه سری پایگاه اطلاعاتی مختلف استفاده کرده و برای هر پایگاه اطلاعاتی 11 نوع تابع انتقالی با ورودی‌های متفاوت ایجاد کردند. اعتبار توابع انتقالی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که توابع انتقالی با مقیاس بین‌المللی، دقت مناسبی دارند و می‌توان از آن‌ها به جای توابع انتقالی ملی و حتی به جای اندازه‌گیری مستقیم استفاده کرد.

سالارز و همکاران (2008)، جریان زهکشی را با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده از توابع انتقالی ارزیابی کرده‌اند. ایشان از مدل توابع انتقالی رزتا برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کردند. در این مدل از داده‌های بافت خاک، چگالی ظاهری و یک یا دو نقطه از منحنی رطوبتی استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی جریان زهکشی با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع برآورده شده از نرم‌افزار رزتا، با مقادیر شبیه‌سازی جریان زهکشی با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در خاک‌های درشت‌بافت مشابه است.

پژوهشگران مختلفی مانند پاچپسکی و همکاران (1999) و میناسنی و همکاران (1999) از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی استفاده نمودند. نتایج این پژوهشگران نشان داد، وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از 3 پارامتر می‌رسد توابع انتقالی بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی معمولاً بهتر از توابع انتقالی رگرسیون عمل می‌کند.

در بیشتر مطالعات انجام‌شده در ایران منحنی رطوبتی شاخه و جذب برآورد شده با توابع انتقالی، با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است (یعقوبی و همکاران 1388)، سپاسخواه و بندار (2002) و موذن‌زاده و همکاران (1388)). درحالی‌که در مدل کردن مسائل آبیاری و انتقال املاح، چون رطوبت خاک

جدول 1- برخی از اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه.

ماه	بارندگی ماهانه (mm)	تبخیر - تعرق واقعی ماهانه (mm)	آبیاری (mm)	رطوبت نسبی (%)	دمای هوا (°C)
مرداد	3/3	29	26	65/5	17/9
شهریور	3/53	51	-	77/25	17/3

همکاران 1991)، مقدار پارامترهای θ_s ، α ، n و θ_r محاسبه گردید. پارامترهای مدل ون گنوختن به عنوان ورودی کد هایدروس³ استفاده شد. کد هایدروس یک بعدی نرم-افزاری برای شبیه سازی یک بعدی حرکت آب و املاح در خاک بر اساس حل عددی معادله دیفرانسیلی ریچاردز است (سیمونک و همکاران 2005). مقادیر رطوبت خاک در شروع دوره شبیه سازی (7 مردادماه)، به عنوان شرایط اولیه با اندازه گیری در محل تعیین شد. مقدار بارش از اطلاعات هواشناسی به دست آمد. مقادیر دبی آبیاری با قرار دادن پارشال فلوم 3 اینچی اندازه گیری شد، مدل فوس و همکاران (1978) به عنوان مدل جذب ریشه مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای این مدل برای سیب زمینی به وسیله وسلینگ (1991) تعیین شده است (به نقل از سیمونک و همکاران 2005). با در نظر گرفتن اطلاعات یادشده، با استفاده از هایدروس تغییرات رطوبت از 7 مرداد تا 28 شهریور شبیه سازی گردید. افزون بر منحنی رطوبتی اندازه گیری شده، از منحنی رطوبتی برآورد شده به وسیله توابع انتقالی نیز به عنوان ورودی کد هایدروس برای شبیه سازی تغییرات رطوبت استفاده گردید.

در پژوهش حاضر، توابع انتقالی گوناگونی بکار رفتند که از جمله آن‌ها، دو مجموعه توابع انتقالی با مقیاس اشتقاق بین المللی، سویل پار (آکوئیس و دوناتل 2003) و رزتا (شاپ و همکاران 2001) بود. رزتا در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت، بار اول فقط با داده های شن، سیلت و رس (SSC) و بار دیگر با همین داده های شن، سیلت، رس و چگالی ظاهری (SSC BD). شماری از

برای تعیین چگالی ظاهری و بافت خاک به ترتیب از روش های استوانه ای نمونه برداری بلاک و هارتاج (1986) و روش هایدرومتري جی و بودر (1986) استفاده گردید. تبخیر و تعرق واقعی با روش تشتک تبخیر اندازه گیری و داده ها برحسب ساعت به نرم افزار هایدروس وارد گردید. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) به روش بار افتان در نمونه اندازه گیری شد. برای اندازه گیری منحنی رطوبتی از دستگاه صفحه فشاری در مکش 5 بار و ستون آب آویزان در مکش های کمتر از 1 بار (صفر، 5، 10، 20، 30، 40، 50، 60، 70، 80، 90 سانتیمتر آب) استفاده شد (جی و بودر 1986).

برای کمی کردن توابع هیدرولیکی از مدل منحنی رطوبتی ون گنوختن (1980) و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ون گنوختن - معلم (1980) استفاده گردید که به ترتیب به شرح معادلات 1 و 2 می باشند.

$$q = q_r + \frac{(q_s - q_r)}{(1 + |ah|^n)^m} \quad \text{و} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad [1]$$

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

$$\text{و} \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

پارامترهای این مدل، θ_r و θ_s که به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی مانده در خاک، n و α ضرایب مدل، h مکش ماتریک خاک در رطوبت θ ، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، m و l نیز پارامترهای تجربی می باشند.

با برازش مدل ون گنوختن به داده های منحنی رطوبتی اندازه گیری شده توسط RETC (ون گنوختن و

توابع انتقالی عبارت‌اند از، وستن (1997، 1999 و 2001)، راولز و براکنسیک (1989)، قربانی دشتکی و همایی (1381)، سپاسخواه و بندار (2002)، قربانی دشتکی- همایی اصلاح شده و تابع اصلاح شده سپاسخواه- بندار (دو تابع اخیر اصلاح شده توسط موذن زاده و همکاران (1388) هستند)، توابع پارامتریک اول و دوم یعقوبی و رسول زاده (1388)، وریکن و همکاران (1990) و سویل- پار (وریکن) برای معادله ون گنوختن، مورد بررسی قرار گرفت. توابع بعد از این با عناوین که در جدول 2 اعمال شده‌اند بکار خواهند رفت.

جدول 2- عناوین به کار برده شده برای هر تابع انتقالی.

عناوین بکار رفته	توابع انتقالی	عناوین بکار رفته	توابع انتقالی	عناوین بکار رفته	توابع انتقالی
R(SSC)	SSC (شاپ و همکاران 2001)	Gh-(1)	تابع اول قربانی و همایی (1381)	Ve (1990)	وریکن و همکاران (1990)
R(SSC BD)	SSCBD (شاپ و همکاران 2001)	Gh-(2)	تابع دوم قربانی و همایی (1381)	Soilpar-v	سویل پار (وریکن)
w-1997	وستن (1997)	Sepas	سپاسخواه و بندار (2002)	Rawls-v-89	راولز و براکنسیک (1989)
w-1999	وستن (1999)	Gh (Adj.)	قربانی- همایی اصلاح شده (موذن زاده و همکاران 1388)	Y-(1)	تابع اول یعقوبی و رسول زاده
w-2001	وستن (2001)	Sepas (Adj.)	سپاسخواه- بندار اصلاح شده (موذن زاده و همکاران 1388)	Y-(2)	تابع دوم یعقوبی و رسول زاده

برای قضاوت دقیق‌تر در خصوص صحت تخمین مدل‌ها از NRMSE نیز استفاده شده است. مقدار NRMSE بین صفر و یک هست که گاهی اوقات این شاخص به صورت درصد نیز بیان می‌شود. به طور کلی مدلی که NRMSE کمتر داشته باشد صحت تخمین بهتری خواهد داشت. مقادیر کمتر از 0/1 NRMSE صحت تخمین ایده آل در مدل‌سازی دارند، مقادیر بین 0/1 تا 0/2 و 0/2 تا 0/3 به ترتیب صحت تخمین مناسب و متوسط و مقادیر بالاتر از 0/3 فاقد اعتبار مناسب در مدل‌سازی هستند. (ثامنی و همکاران 1393).

معیارهای آماری مورد استفاده در این پژوهش، برای ارزیابی صحت⁴ منحنی رطوبتی و جریان آب شبیه‌سازی شده با توابع انتقالی، شامل، میانگین خطا (ME)، شاخص همخوانی اصلاح شده (d) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بودند. شاخص ME بیانگر راستای خطا بوده و مقادیر منفی و مثبت آن به ترتیب بیانگر بیش برآورد و کم برآورد مدل است، مقدار آن هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد مدل مناسب‌تر است. شاخص d همخوانی اصلاح شده بوده و محدوده آن بین صفر تا یک است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، برآوردها دارای خطای کمتری نسبت به مقادیر اندازه-گیری شده دارند (سالارز و همکاران 2008). همچنین

انتقالی مختلف همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده برای عمق‌های 15، 45 و 75 در شکل 1 تا 3 نشان داده شده است. شکل 1 نشان می‌دهد که از بین توابع انتقالی بررسی شده، توابع انتقالی Gh-(1)، Gh-(2)، Sepas، Y-(1) و Y-(2) بهترین شبیه‌سازی را برای منحنی رطوبتی عمق 15 سانتی‌متر داشتند. شکل 2 نشان می‌دهد که توابع انتقالی Gh-(1)، Sepas، Y-(1) و Y-(2) شبیه‌سازی نسبتاً مناسبی برای عمق 45 سانتی‌متر ارائه کردند. در شکل 3 نیز، توابع انتقالی Gh-(1) و Gh-(2) بهترین شبیه‌سازی را برای منحنی رطوبتی عمق 75 سانتی‌متر داشتند. به نظر می‌رسد مشخصات خاک‌های قربانی تطبیق بهتری داشته است، بر همین اساس این توابع برای عمق 75 سانتی‌متر سازگاری بهتری را نشان داده است (شکل 1-3).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad [3]$$

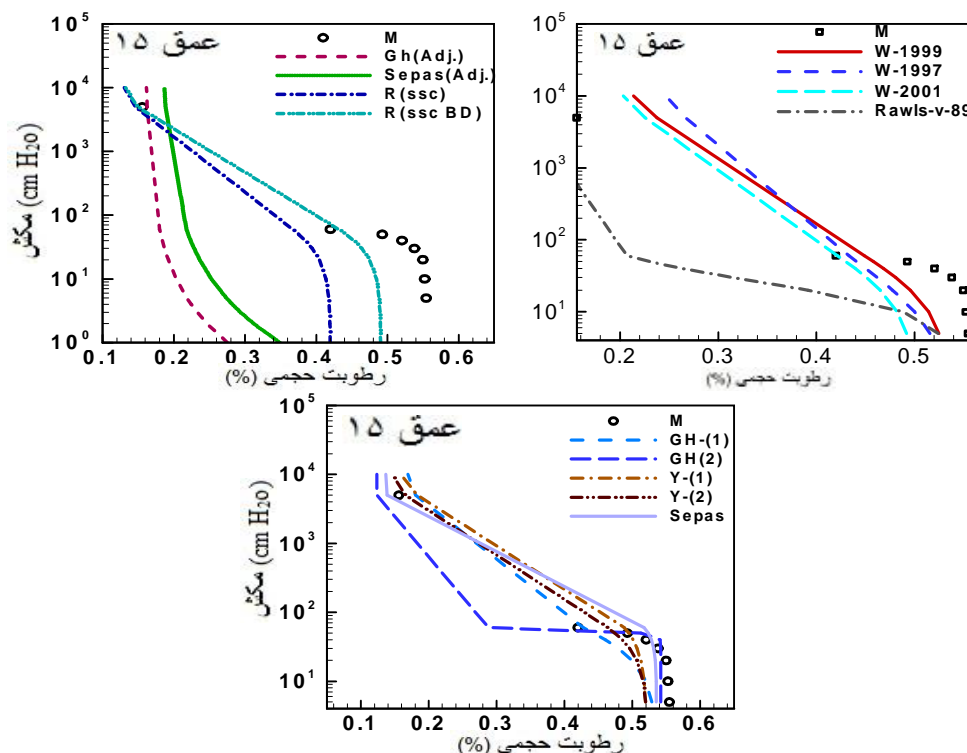
$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad [4]$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i|^2}}{\bar{O}} \quad [5]$$

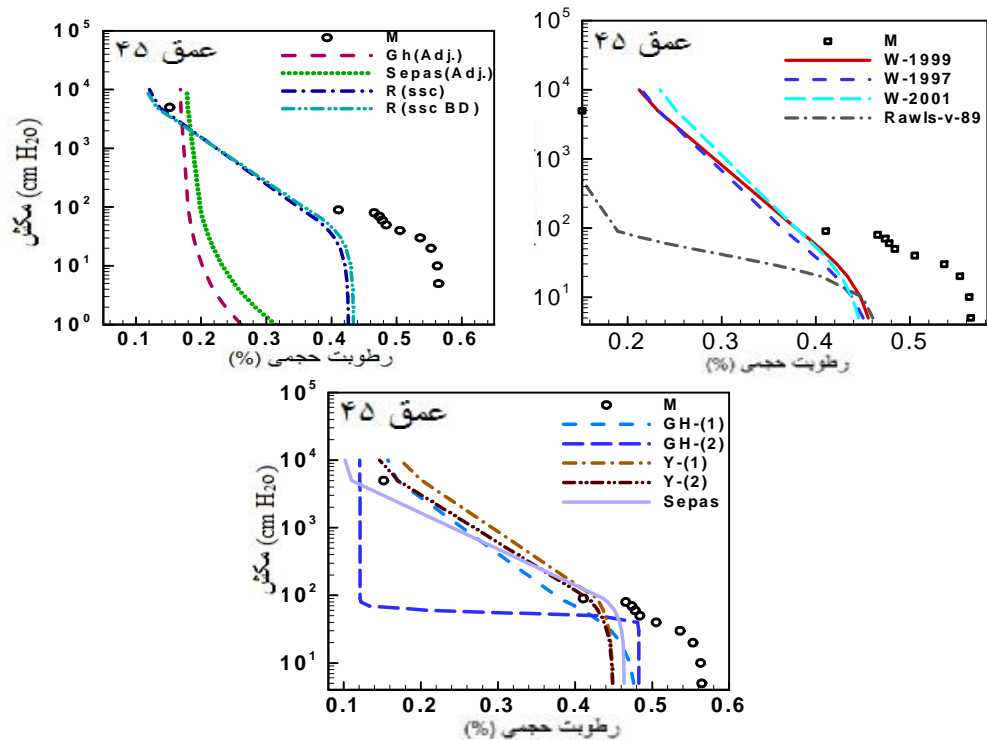
O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، S_i مقادیر برآورد شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد داده‌ها هست.

نتایج و بحث

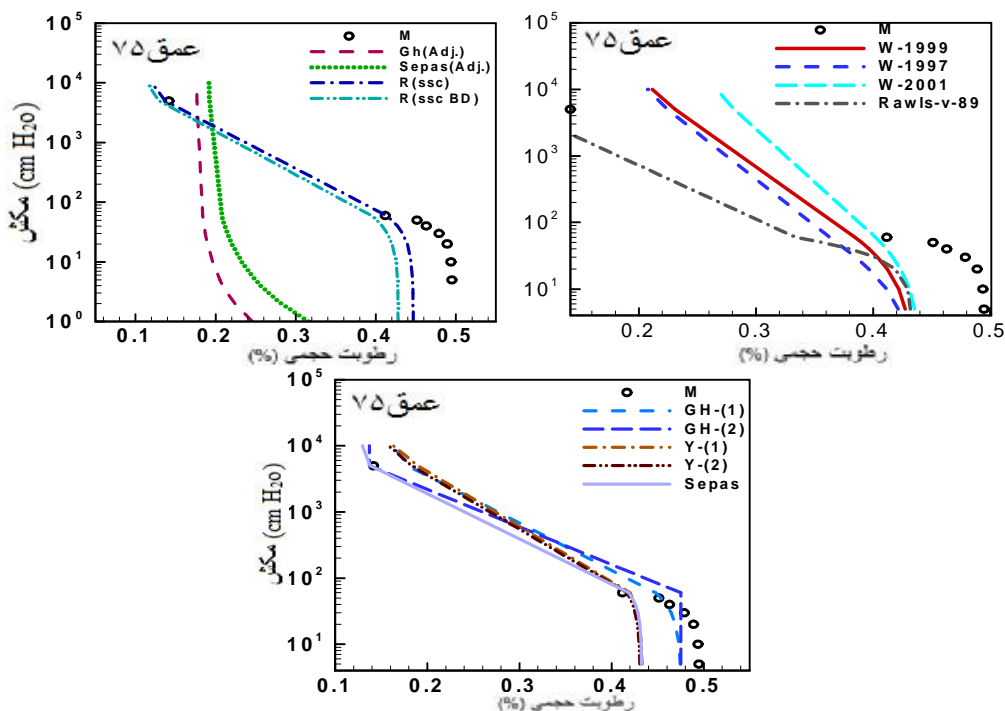
برای مقایسه دقت توابع انتقالی برای برآورد منحنی رطوبتی، منحنی رطوبتی برآورد شده توسط توابع



شکل 1- منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده (M) و برآورد شده با توابع انتقالی مختلف برای عمق 15 سانتی‌متر.



شکل 2- منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده (M) و برآورد شده با توابع انتقالی مختلف برای عمق 45 سانتی‌متر.



شکل 3- منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده (M) و برآورد شده با توابع انتقالی مختلف برای عمق 75 سانتی‌متر.

75 (0/61، 0/63 و 0/63) و نرم‌افزار soilpar(ve) به‌دلیل برآورد مقادیر خیلی کم α و n برای هر سه عمق 15، 45 و 75 (0 و 0/45)، (0 و 0/55) و (0 و 0/5) شبیه‌سازی

توابع R(SSC) و Sepas نیز شبیه‌سازی نسبتاً مناسبی را برای عمق 75 سانتی‌متر ارائه کردند. تابع vereecken به‌دلیل برآورد مقادیر کم n برای هر سه عمق 15، 45 و

آن‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

مناسبی نشان ندادند، به همین علت از ارائه منحنی vereecken و soilpar(ve) اجتناب و مقادیر محک آماری

جدول 3- مقادیر محک‌های آماری برای ارزیابی کمی اعتبار توابع انتقالی در برآورد منحنی رطوبتی خاک.

ME (cm ³ cm ⁻³)			d			NRMSE			توابع انتقالی بکار رفته
عمق (cm)			عمق (cm)			عمق (cm)			
15	45	75	15	45	75	15	45	75	
0/029	0/088	0/060	0/589	0/358	0/399	0/130	0/218	0/183	w-1997
0/020	0/077	0/047	0/674	0/385	0/432	0/099	0/198	0/158	w-1999
0/048	0/080	0/030	0/544	0/356	0/395	0/142	0/210	0/159	w-2001
0/113	0/107	0/035	0/433	0/395	0/684	0/254	0/238	0/092	R(SSC)
0/052	0/099	0/053	0/614	0/413	0/571	0/124	0/220	0/131	R(SSC BD)
0/142	0/175	0/071	0/433	0/286	0/497	0/354	0/389	0/166	Rawls-v-89
-0/070	0/030	-0/063	0/535	0/286	0/523	0/293	0/238	0/286	Soilpar-v
-0/096	-0/019	-0/045	0/27	0/001	0/158	0/589	0/427	0/460	Ve(1990)
0/030	0/069	0/003	0/749	0/483	0/839	0/085	0/158	0/053	Gh-(1)
0/019	0/144	-0/001	0/847	0/334	0/85	0/097	0/391	0/060	Gh-(2)
0/253	0/261	0/198	0/282	0/235	0/248	0/598	0/601	0/574	Gh (Adj.)
0/011	0/059	0/034	0/766	0/454	0/553	0/077	0/167	0/115	Y-(1)
0/022	0/066	0/037	0/759	0/483	0/558	0/074	0/168	0/118	Y-(2)
-0/003	0/054	0/040	0/84	0/528	0/622	0/077	0/141	0/109	Sepas
0/219	0/249	0/195	0/287	0/206	0/224	0/520	0/561	0/508	Sepas(Adj.)

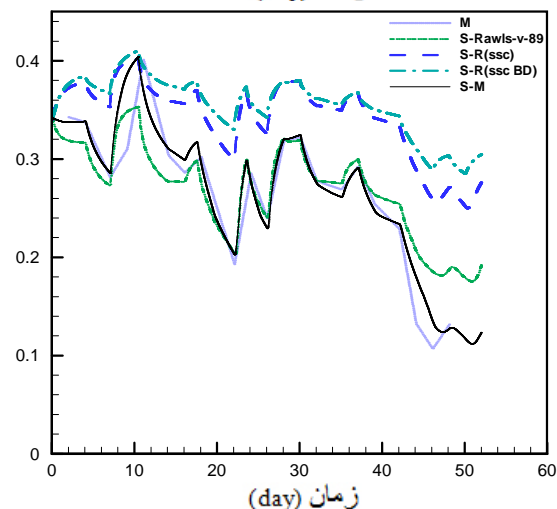
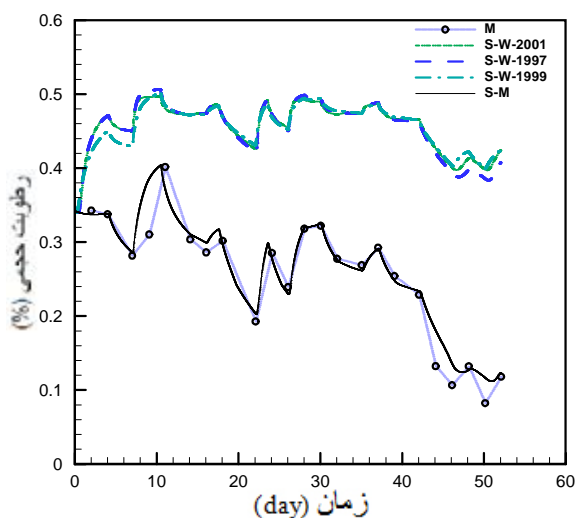
ارزیابی کمی اعتبار توابع انتقالی پارامتریک

موردبررسی در برآورد منحنی رطوبتی خاک

به منظور مقایسه کمی عملکرد توابع انتقالی موردبررسی در برآورد منحنی رطوبتی، مقادیر معیار آماری محاسبه و نتایج در جدول 3 ارائه شد. مقایسه هم‌زمان معیارهای آماری d، NRMSE و ME عمق 15 سانتی‌متر نشان داد که توابع انتقالی Sepas، Y-(1)، Y-(2)، Gh-(1) و Gh-(2) با برآورد کمترین مقادیر NRMSE و بیشترین مقدار d بالاترین عملکرد را در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی داشتند، که مقادیر NRMSE کمی آن‌ها به ترتیب 0/077، 0/074، 0/077، 0/085 و 0/097 و مقدار معیار آماری d آن‌ها به ترتیب 84/0، 0/766، 0/759، 0/749 و 0/847 به دست آمد. مقایسه معیارهای آماری

عمق 45 سانتی‌متر نشان داد که عملکرد توابع انتقالی بررسی شده در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی در حد متوسط هست، از بین توابع موردبررسی، توابع انتقالی Sepas، Gh-(1)، Y-(2)، Y-(1) با بیشترین مقدار d و NRMSE زیر 0/2 شبیه‌سازی مناسبی را ارائه کردند، به طوری که مقادیر d و NRMSE این توابع به ترتیب 0/528، 0/483، 0/483، 0/454 و 0/141، 0/168، 0/167، 0/158 برآورد گردید. مقایسه معیارهای آماری عمق 75 سانتی‌متر نیز نشان داد که توابع انتقالی Sepas، Gh-(1) و Gh-(2) بالاترین عملکرد را در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی خاک دارند، این توابع با برآورد NRMSE کمتر از 0/1 مناسب‌ترین شبیه‌سازی را انجام دادند، به طوری که مقادیر NRMSE آن‌ها به ترتیب 0/109، 0/053 و 0/060 و مقادیر d این توابع به ترتیب

اگرچه، نحوه تطابق منحنی شبیه‌سازی شده این توابع با منحنی (S-M) یکسان نیست، که نشان دهنده دقت کم این توابع در شبیه‌سازی جریان آب در خاک می‌باشد. در عمق 15 سانتی‌متر، بهترین شبیه‌سازی انجام شده از بین توابع انتقالی مربوط به تابع Rawls-v-89 می‌باشد (شکل 4). دلیل تطابق ضعیف بقیه توابع انتقالی، برآورد کم مقادیر n می‌باشد، برآورد کم این پارامتر سبب می‌شود که شیب منحنی کم برآورد شود، توابع W-1999، W-1997 مقادیر n را حدود 1/1 برآورد کردند. در عمق 75 سانتی‌متر نیز توابع Rawls-v-89 در مقایسه با سایر توابع مناسبترین شبیه‌سازی جریان آب در خاک را نشان داد، در حالی که برای عمق 45 سانتی‌متر نتیجه رضایت‌بخش نبود (شکل‌های 5 و 6).

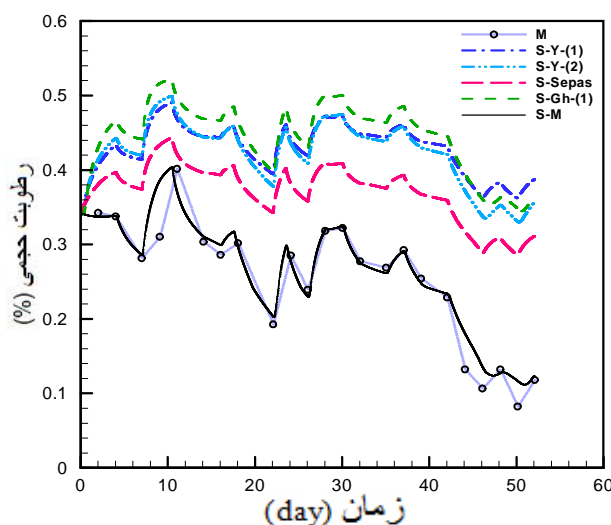


0/622, 0/839, 0/85 و 0/684 به دست آمد. از بین توابع مورد بررسی، تابع vereecken، تابع Gh(Adj) و Sepas(Adj)، کمترین دقت را در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی داشتند. مقادیر d عمق 15 سانتی‌متر این توابع به ترتیب 0/27، 0/282 و 0/287 به دست آمد.

نتایج این پژوهش با نتایج گیوی و همکاران (2004) همخوانی دارد، ایشان 13 تابع انتقالی (از جمله وریکن و همکاران 1989) را بر روی خاک‌های ریزبافت ارزیابی کردند، تابع انتقالی وریکن و همکاران عملکرد خوبی نشان ندادند، در عین حال که، ترابی فارسانی و قهرمان (1386) در مورد تابع وریکن، به نتایج معکوسی دست یافتند. یافته‌های خدوردیلو و همکاران (1390) با نتایج این تحقیق، که بیان داشتند ارزیابی اعتبار توابع انتقالی از نظر برآورد پارامترها یا منحنی رطوبتی خاک ممکن است متفاوت باشد، همخوانی دارد. نتایج این پژوهش، با نتایج ترابی فارسانی و قهرمان (1386) همخوانی دارد. ایشان 4 مدل داخلی را برای تخمین منحنی رطوبتی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که دو تابع انتقالی اول و دوم قربانی و همکاران مناسبترین عملکرد را دارند.

ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در شبیه‌سازی جریان آب در خاک

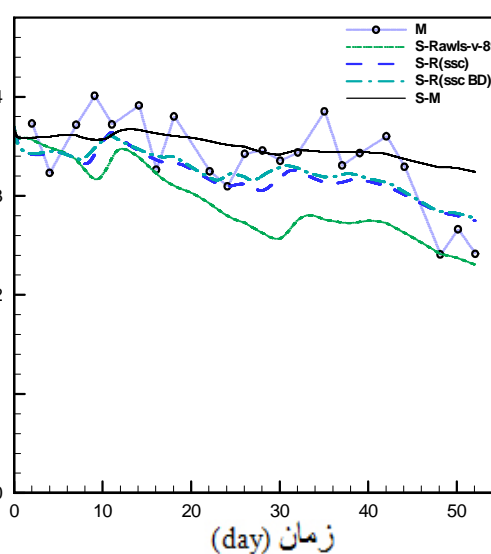
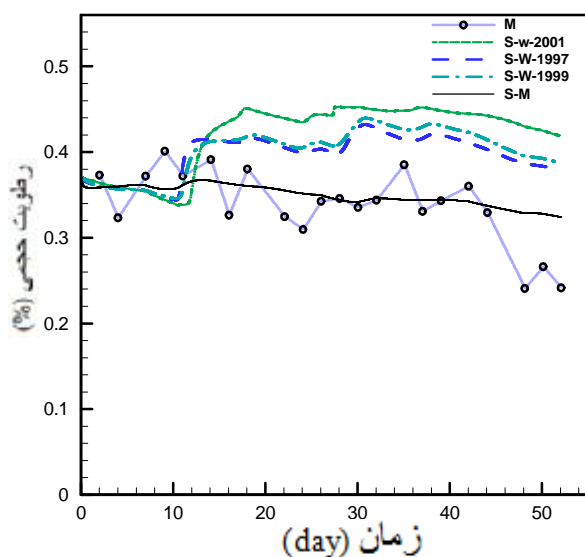
تغییرات رطوبت نسبت به زمان با کد هایدروس با در نظر گرفتن منحنی رطوبتی برآورد شده توسط توابع انتقالی شبیه‌سازی گردید (شکل 4 تا 6). در این شکل‌ها، (S-M) مربوط به تغییرات رطوبت شبیه‌سازی شده توسط هایدروس با ویژگی‌های هیدرولیکی به دست آمده از برازش منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده به مدل ون گنوختن با استفاده از RETC بوده و M نیز رطوبت اندازه‌گیری شده با مته نمونه‌برداری می‌باشد. از بین توابع بررسی شده، تنها توابع W-1999، W-، W-2001، R(SSC), R(SSC BD), Sepas, Y(1), Y(2), Gh(1) و Rawls-v-89 قادر به شبیه‌سازی جریان آب در خاک (مدل‌سازی تغییرات رطوبت نسبت به زمان) بودند.

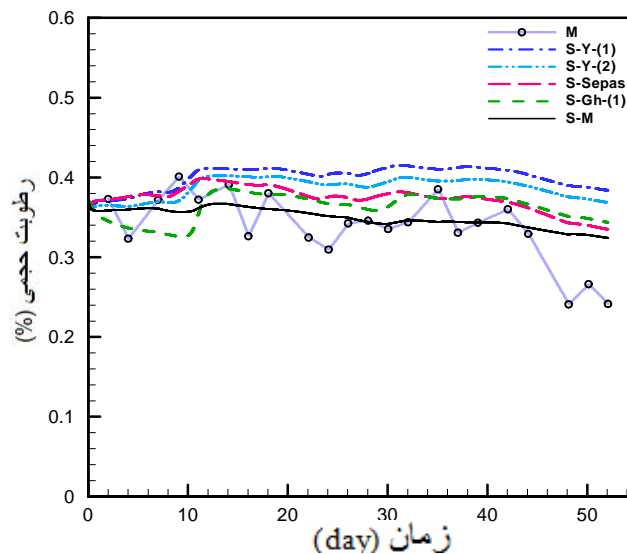


شکل 4- شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک نسبت به زمان با کد هایدروس برای عمق 15 سانتی‌متر با به‌کارگیری منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده S-M و برآورد شده از توابع انتقالی مختلف.

0/168 و 0/088 و بیشترین مقدار 0/730 و 0/897 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک ارائه کردند. از بین همه توابع مورد بررسی، توابع W-1997، W-1999، W-2001 ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک داشتند، به طوری که - مقادیر d و NRMSE آنها به ترتیب 0/253، 0/254 و 0/251 و 0/840، 0/840، 0/842 به دست آمد (جدول 4).

بررسی کمی دقت توابع انتقالی در شبیه‌سازی جریان آب در خاک با استفاده از معیارهای آماری به منظور مقایسه عملکرد توابع انتقالی که قادر به برآورد جریان آب در خاک بودند، مقادیر معیار آماری محاسبه و نتایج در جدول 4 ارائه شد. مقایسه معیارهای آماری عمق 15 سانتی‌متر (جدول 4) نشان داد که منحنی رطوبتی برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط RETC (S-M) و تابع-انتقالی Rawls-v-89 با کمترین مقدار NRMSE به ترتیب

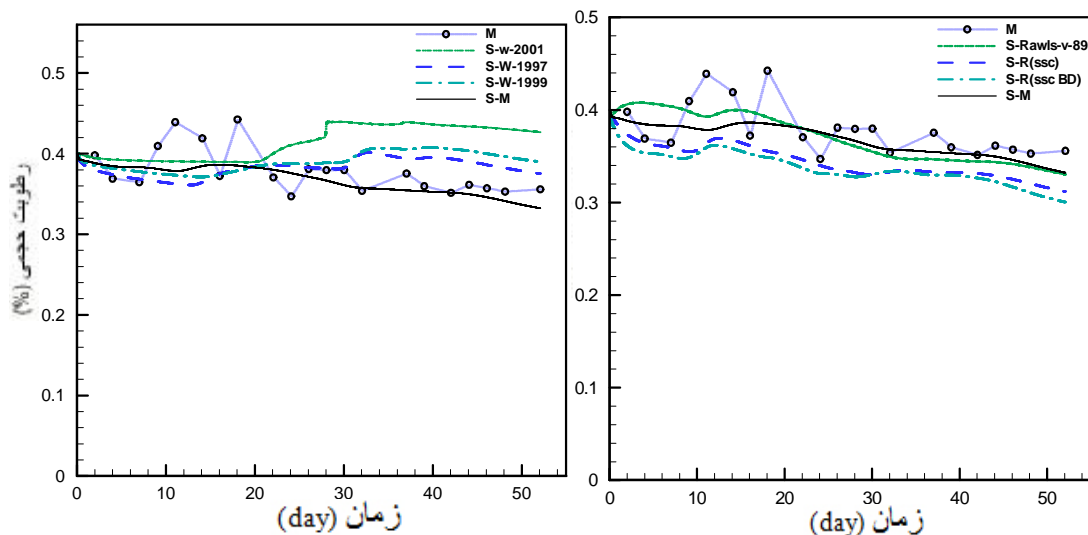


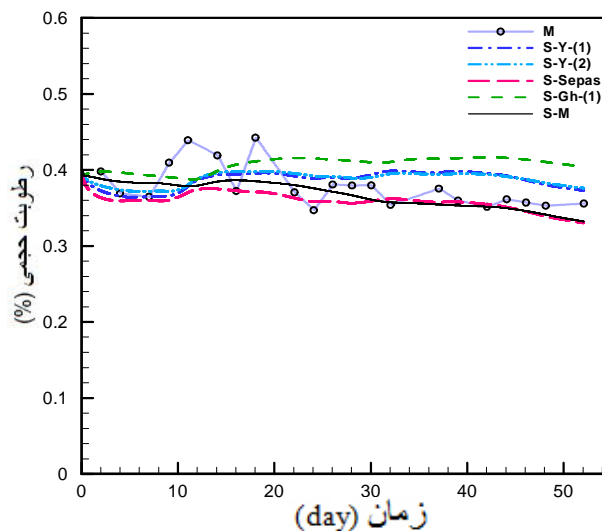


شکل 5- شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک نسبت به زمان با کد هایدروس برای عمق 45 سانتی‌متر با به‌کارگیری منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده S-M و برآورد شده از توابع انتقالی مختلف.

سازی نسبتاً مناسبی داشتند. مقادیر این توابع به ترتیب 0/678، 0/444، 0/435، 0/4، 0/446 و مقادیر NRMSE آنها به ترتیب 0/116، 0/140، 0/131، 0/190 و 0/20 به دست آمدند. از بین توابع ملی، تابع انتقالی Sepas در مقایسه با سایر توابع مناسب‌ترین عملکرد را در این عمق نشان داد (جدول 4).

مقایسه معیارهای آماری عمق 45 سانتی‌متر بیانگر عملکرد متوسط توابع انتقالی همراه با کد هایدروس در شبیه‌سازی جریان آب در خاک می‌باشد. معیارهای آماری نشان دادند، منحنی رطوبتی برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط RETC (S-M)، توابع انتقالی R(SSC)، R(SSC BD)، R(SSC v-89) و Sepas شبیه-





شکل 6- شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک نسبت به زمان با کد هیدروس برای عمق 75 سانتی‌متر با به‌کارگیری منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده S-M و برآورد شده از توابع انتقالی مختلف.

توابع Rawls-v-89 و Sepas به ترتیب با d ، 0/522 و 0/465 بیشترین دقت را برای مدل کردن حرکت آب در خاک همراه با کد هیدروس را نشان دادند.

مقایسه معیارهای آماری عمق 75 سانتی‌متر نیز بیان‌گر عملکرد ضعیف توابع در شبیه‌سازی جریان آب در خاک می‌باشد به طوری که از بین توابع ملی و بین‌المللی،

جدول 4- مقادیر محک‌های آماری برای ارزیابی کمی اعتبار توابع انتقالی در شبیه‌سازی جریان آب.

ME ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)			d			NRMSE			توابع انتقالی
عمق (cm)			عمق (cm)			عمق (cm)			
15	45	75	15	45	75	15	45	75	
-0/006	-0/017	0/010	0/897	0/678	0/472	0/088	0/160	0/071	S-M
-0/201	-0/070	-0/008	0/254	0/28	0/045	0/830	0/281	0/091	w-1997
-0/202	-0/065	-0/003	0/253	0/304	0/091	0/840	0/301	0/101	w-1999
-0/204	-0/090	-0/036	0/251	0/222	0/117	0/842	0/371	0/150	w-2001
-0/099	0/008	0/042	0/405	0/444	0/336	0/445	0/131	0/125	R(SSC BD)
-0/088	0/012	0/035	0/432	0/435	0/376	0/388	0/140	0/110	R(SSC)
-0/011	0/042	0/007	0/730	0/4	0/522	0/168	0/190	0/070	Rawls-v-89
-0/175	-0/069	-0/007	0/281	0/346	0/188	0/729	0/281	0/081	Y-(1)
-0/168	-0/056	-0/009	0/290	0/372	0/172	0/689	0/240	0/080	Y-(2)
-0/115	-0/043	0/019	0/372	0/446	0/465	0/493	0/200	0/080	Sepas
-0/191	-0/030	-0/029	0/339	0/265	0/193	0/772	0/201	0/124	Gh-(1)

S-M: منحنی رطوبتی برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط RETC

نتیجه‌گیری کلی

15 سانتی‌متر، توابع انتقالی Sepas، Y-(1)، Y-(2)، Gh-(1) و Gh-(2) و برای عمق 75 سانتی‌متر توابع انتقالی Gh-(1)، Gh-(2)، R(SSC) و Sepas می‌باشند، در عین حال

نتایج نشان داد که بهترین توابع انتقالی برای شبیه‌سازی منحنی رطوبتی در خاک مورد مطالعه، برای عمق

15 سانتی‌متر همه توابع انتقالی به دلیل برآورد کم مقادیر پارامتر n و گاهی به دلیل برآورد زیاد مقادیر θ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، قادر به شبیه‌سازی با دقت بالا نبودند. توابع انتقالی $Y(1)$ ، $Y(2)$ و $Gh(1)$ مقادیر n را برای عمق 15 سانتی‌متر به ترتیب $1/41$ ، $1/43$ و $1/47$ برآورد کردند، درحالی که مقدار n اندازه‌گیری شده $4/64$ می‌باشد. بنابراین شبیه‌سازی این توابع انتقالی با دقت مناسب انجام نشد. شایان ذکر است، نوسانات نشان داده شده در شبیه‌سازی جریان آب در خاک‌های زیرسطحی، می‌تواند ناشی از جریان‌های ترجیحی باشد و چون در مدل کردن حرکت آب در خاک جریان‌های ترجیحی در نظر گرفته نشده است، لذا عدم تطابق شبیه‌سازی جریان آب در خاک با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده می‌تواند ناشی از آن باشد. نتایج نشان داد، در غالب موارد توابع انتقالی بین‌المللی عملکرد مناسب‌تری نسبت به توابع ملی داشتند.

توابع انتقالی Sepas، $Y(1)$ ، $Y(2)$ و $Gh(1)$ شبیه‌سازی متوسطی در عمق 45 سانتی‌متر نشان دادند. با بررسی توانایی توابع انتقالی در شبیه‌سازی جریان آب در خاک مشخص گردید که توابع $W-1997$ ، $W-1999$ ، $W-2001$ ، $R(SSC)$ ، $R(SSCBD)$ ، $Y(1)$ ، $Y(2)$ ، $Rawls-v-89$ و $Gh(1)$ توانایی شبیه‌سازی جریان آب در خاک مورد مطالعه را دارند، هرچند که دقت شبیه‌سازی این توابع انتقالی در بیشتر موارد در حد متوسط بوده است. تابع $Rawls-v-89$ در هر سه عمق شبیه‌سازی را با دقت مناسب انجام داد. بعلاوه، توابع $R(SSC)$ ، $R(SSCBD)$ و Sepas نیز مناسبترین شبیه‌سازی را برای خاک‌های زیرسطحی داشتند. این توابع منحنی رطوبتی را نیز با دقت مناسبی برآورد کردند.

توابع انتقالی ناکارآمد در شبیه‌سازی جریان آب در خاک، به دلیل برآورد نامناسب پارامترهای معادله ون-گنوختن و انحراف آنها از مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی را با دقت مناسب برآورد نکردند. در عمق

منابع مورد استفاده

- ترابی فارسانی ن و قهرمان ب، 1386. مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک در ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران. جلد 1، شماره 2، صفحه‌های 25 تا 57.
- ثامنی ع، پاکجو م، موسوی ع و کامکار حقیقی ع، 1393. ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب های شور و سدیمی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد 28، شماره 2، صفحه‌های 395 تا 408.
- جعفری گیلانده ص، رسولزاده ع و خداوردیلو ح، 1392. ارزیابی برخی توابع انتقالی برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار آب در خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، جلد 2، شماره 4، صفحه‌های 1 تا 13.
- خداوردی لو ح، قربانی دشتکی ش، نریمانی ز و شهنازی ا، 1390. ارزیابی کاربردی توابع انتقالی پارامتریک در برآورد رطوبت در برخی خاک‌های آهکی. صفحه‌های 1 تا 5، دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، 12 الی 14 شهریور، دانشگاه تبریز، تبریز.
- قربانی دشتکی ش و همایی م، 1381. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره 12، صفحه‌های 1 تا 16.
- موزن زاده ر، قهرمان ب، داوری ک و خشنود یزدی ع، 1388. ارزیابی عملکرد چند تابع انتقالی داخلی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 23، شماره 4، صفحه‌های 55 تا 66.
- یعقوبی ع و رسولزاده ع، 1388. ایجاد توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد منحنی رطوبتی خاک. صفحه‌های 1 تا 8، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 24 الی 26 آذر، دانشگاه تهران، تهران.
- Acutis M and Donatella M, 2003. Soil part 2: software to estimate soil hydrological parameters and functions. Europe. J. Agron 18: 373-377.
- Blake GR and KH Hartge, 1986. Bulk Density. Pp.363-375. In: Klute A, (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1 - Physical and Mineralogical Methods Second Edition. J. ASA and SSSA. Madison WI.

- Gee GH, Bauder JW, 1986. Particle size analysis, Pp.383-409. In *Methods of Soil Analysis. Part 2, Physical properties*. SSSA: Madison, WI.
- Feddes RA, Kowalik PJ and Zaradny H, 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons. New York, NY.
- Givi J, Prasher SO and Patel RM, 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agric Water Manag* 70: 83 – 96.
- Minasny B, Mc Bratney AB and Bristaw KL, 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93: 225-253.
- Nemes A, Schaap M G and Wösten J H M, 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different Scales of data collection. *Soil Sci Soc Am J* 67: 1093-1102.
- Pachepsky YA, Timline D and Varallyay G, 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci J* 60: 727-733.
- Rawls WJ and Brakensiek, DL, 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. pp. 275–300. In: Morel S, (ed.). *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling. Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht.
- Salazar O, Wesstrom I and Joel A, 2008. Evaluation of Drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agric Water Manag* 95: 1135-1143.
- Schaap MG, Leij FJ and van Genuchten MTh, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J Hydrol* 251: 163–176.
- Sepaskhah A and Bondar H, 2002. Estimation of Manning roughness coefficient for bare and vegetated furrow irrigation. *Biosystems Eng.* 82: 351-357.
- Šimůnek J, van Genuchten MTh and Šejna M, 2005. *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. Department of Environmental Sciences University of California Riverside, California.
- Van Genuchten MTh and Wierenga PJ, 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions. *Soil Sci Soc Am J* 40: 473-481.
- 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.
- Van Genuchten MTh, Leij FJ and Yates SR, 1991. *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic functions of Unsaturated Soils* Office of research and development U. S. Environmental Protection Agency ADA, Oklahoma.
- Vereecken H, Maes J and Feyen J, 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil sci J* 149:1-12.
- Vereecken H, Maes J, Feyen J and Darius P, 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci J.* 148: 389–403.
- Wösten JHM, 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. Pp. 221-245. In: Gregorich EG, Carter MR, (Eds). *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Sci, Vol. 25*, Elsevier, Amsterdam.
- Wösten JHM, Lilly A, Nemes A and Le Bas C, 1999. Development and use of a data base of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185.
- Wösten JHM, Pachepsky Ya A and Rawls WJ, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J Hydrol* 251:123-150.