نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۲

ISSN 2251-7480

# ارزیابی برخی توابع انتقالی برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار آب در خاک

صنم جعفری گیلانده [۱]، علی رسول‌زاده [۲] و حبیب خداوردیلو [۳*]

۱) دانشجو کارشناسی ارشد؛ گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ارومیه؛ ارومیه؛ ایران

۲) استادیار گروه مهندسی آب؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ اردبیل؛ ایران

۳*) استادیار گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ارومیه؛ ارومیه؛ ایران؛ نویسنده مسئول مکاتبات: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۲۴

## چکیده

بیان کمّی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای هر گونه برنامه‌ریزی در حفاظت از منابع آب و خاک ضروری است. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، ورودی‌هایی مهم برای مدل‌سازی جریان آب و انتقال املاح در خاک هستند. بدلیل زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های مستقیم اندازه‌گیری این ویژگی‌ها، توابع انتقالی خاک (PTFs) به طور گسترده و موفق برای برآورد آنها استفاده شده‌اند. با این حال، تلاش‌هایی اندک در زمینه ارزیابی کاربردی دقت برآوردهای حاصل از PTFها در شبیه‌سازی جریان غیرماندگار آب در خاک صورت گرفته است. در این پژوهش، منحنی رطوبتی یک خاک رسی توسط برخی از PTFهای محلّی و جهانی برآورد گردید. منحنی رطوبتی خاک همچنین با روش مستقیم در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. اعتبار PTFهای مورد مطالعه از نظر برآورد منحنی رطوبتی خاک بررسی شد. با وارد کردن هر دو پارامترهای برآورد شده و اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی به برنامه HYDRUS-1D، جریان آب در این خاک شبیه‌سازی و دقت کاربردی PTFها از نظر شبیه‌سازی جریان آب در خاک به طور کمّی مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هر دو PTF جهانی (رزتا) با میانگین مربعات خطای (RMSE) کمتر از $cm^3cm^{-3}$ ۰/۰۲۵ و برخی PTFهای منطقه‌ای (قربانی–۱) با $cm^3cm^{-3}$ RMSE <۰/۰۱۴، می‌توانند منحنی رطوبتی خاک سطحی را به گونه‌ای مناسب برآورد کنند. برای برآورد منحنی رطوبتی خاک زیرسطحی مقدار RMSE برای توابع جهانی بزرگتر از $cm^3cm^{-3}$ ۰/۱۰۷ و برای توابع محلّی در محدوده $cm^3cm^{-3}$ ۰/۳۵۶ – ۰/۰۳۶ بود. با این حال، برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک، گروه دیگری از PTFها کارآمدتر بودند. مقادیر RMSE تابع قربانی اصلاح شده برای شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵۵ $cm^3cm^{-3}$ بود. مقدار RMSE توابع وستن (۱۹۹۹، ۱۹۹۷) نیز برای خاک سطحی بزرگتر از ۰/۱۴۹ و برای خاک زیرسطحی کوچکتر از ۰/۰۵۸ $cm^3cm^{-3}$ بود. مقدار RMSE شبیه‌سازی شده با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای خاک سطحی و زیرسطحی به‌ترتیب ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۴۰ $cm^3cm^{-3}$ بود. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در ارزیابی اعتبار PTFها باید به نوع کاربردی که قرار است از PTFها داشته باشیم، توجه شود. یک PTF می‌تواند برای برآورد منحنی رطوبتی خاک دقت کافی داشته باشد ولی برای برآورد گستره خاص $\theta(h)$ حاکم بر فرایند بازتوزیع رطوبت در خاک، دقیق نباشد. استفاده از چنین PTFی می‌تواند منجر به ایجاد خطاهای بالایی در شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک گردد.

**واژه‌های کلیدی:** ارزیابی کاربردی؛ توابع انتقالی خاک؛ جریان آب در خاک؛ مدل‌های شبیه‌سازی

**مقدمه**

جریان غیر اشباع آب در خاک اهمیت زیادی در مسایل آبیاری و زهکشی، هیدرولوژی و حرکت املاح در خاک دارد. از ویژگی‌های مهم در بخش غیراشباع خاک، منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع هستند که بیان کمّی آنها برای استفاده در مدل‌سازی جریان آب و املاح در خاک ضروری است. با این حال، اندازه‌گیری‌های مستقیم این ویژگی‌ها وقت‌گیر و پرهزینه است و به تجهیزات آزمایشگاهی ویژه و تکنسین‌های خبره نیاز دارد. بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی خاک[1](PTF) برای برآورد منحنی‌رطوبتی (خداوردی‌لو ۱۳۸۱؛ Ghorbani Dashtaki *et al.,* 2010؛ Khodaverdiloo *et al.,* 2011) و هدایت هیدرولیکی گسترش یافته است (یعقوبی و رسول‌زاده، ۱۳۸۸).

توابع انتقالی خاک، توابعی رگرسیونی کاملاً تجربی هستند که ویژگی‌های زودیافت خاک مانند داده‌های بافت و ساختمان خاک و میزان مواد آلی را به خصوصیات دیریافت خاک مانند ویژگی‌های هیدرولیکی تبدیل می‌کنند (Larson and Pierce, 1999). تفاوت بین PTFها منجر به تقسیم آنها به دو گروه کلّی PTFهای کلاسی و PTFهای پیوسته شده است.PTFهای کلاسی مقادیری میانگین و تقریبی از ویژگی‌های و پارامترهای دیریافت برای کلاس-های بافتی ویژه ارایه می‌دهند. PTFهای پیوسته ویژگی‌های خاک مانند فراوانی نسبی ذرات، درصد مواد آلی و جرم ویژهٔ ظاهری خاک را به عنوان متغیرهای رگرسیونی در نظر می‌گیرند و ممکن است برای برآورد هر نقطهٔ دلخواه از روابط θ-h-K یا پارامترهای موجود در مدل‌های مربوط به این روابط به کار روند. این PTFها، خود به دو گروه نقطه‌ای و پارامتریک تقسیم می‌شوند. PTFهای نقطه‌ای مقدار رطوبت در یک پتانسیل یا مقدار هدایت هیدرولیکی در یک رطوبت را برآورد می‌کنند. PTFهای پارامتریک، پارامترهای معادلات تجربی- تئوریکی روابط θ(h) و یا K(θ) را به ویژگی‌های خاک ارتباط می‌دهند که می‌توان با انتقال این توابع به معادلات ذکر شده مقادیر θ یا K را در هر مقدار از h یا θ به دست آورد. این روش در مدل‌سازی انتقال آب و املاح در خاک برتری دارد، زیرا نتایج به دست آمده از آن بر خلاف روش قبلی، تابعی پیوسته از روابط θ(h) و یا K(θ) است (Bouma, 1989؛ Wosten, 1997). توابع انتقالی پارامتریک عموماً دقت کمتری دارند که موجب می‌شود کاربران در استفاده از آنها تردید نمایند. با این حال، برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که اگر دقت و اعتبار این توابع از جنبه رطوبت‌های برآورد شده یا شبیه‌سازی رفتارهای خاک از طریق استفاده از این توابع ارزیابی گردد، نتایجی متفاوت از دقت و یا اعتبار خود توابع پارامتریک حاصل می‌شود (Schaap *et al.,* 2004؛ خداوردیلو و همکاران، ۱۳۹۰؛ نوری و همکاران (الف)، ۱۳۹۱؛ نوری و همکاران (ب)، ۱۳۹۱). با این حال، روش ارزیابی اخیر کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. توابع انتقالی را می‌توان با مجموعه داده‌هایی با مقیاس‌های گوناگون از جمله منطقه‌ای، ملّی و بین المللی ایجاد کرد. برخی از توابع بین‌المللی مثل رزتا و سویل‌پار[2] کاربردی گسترده یافته‌اند. با این حال عموماً PTFها ابزاری برای درون‌یابی هستند و برای منطقه‌ای که در آن ایجاد شده‌اند نتایج بهتری ارایه می‌دهند. Nemes et al (۲۰۰۳)، از سه سری پایگاه اطلاعاتی مختلف استفاده کرده و برای هر پایگاه اطلاعاتی ۱۱ نوع تابع انتقالی با ورودی‌های متفاوت ایجاد کردند. اعتبار توابع انتقالی ایجاد شده برای استفاده در خاک‌هایی که در ایجاد توابع انتقالی استفاده نشده بودند، ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که توابع انتقالی با مقیاس بین‌المللی، دقت مناسبی دارند و می‌توان از آنها به جای توابع انتقالی ملّی یا منطقه‌ای و حتی به جای اندازه-گیری مستقیم استفاده کرد.

[1] Pedotransfer Functions

[2] Soilpar

Ghorbani و همکاران (۲۰۰۹)، ۲۳٤ نمونه خاک را با توزیع اندازه ذرات متفاوت به صورت تصادفی جمع آوری کردند و برای ایجاد PTFها، دو گروه از متغیرهای ورودی را به کار بردند: ۱) توزیع اندازه ذرات و جرم‌ویژه ظاهری ۲) جرم‌ویژه ظاهری، میانگین و انحراف معیار هندسی. ایشان دو نوع PTF نقطه‌ای و دو PTF پارامتریک، برای برآورد منحنی رطوبتی ایجاد کردند. همچنین، دقت PTFهای ایجاد شده را با توابع رزتا[1] مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ورودی‌های گروه دوم ٦٥ تا۹۰ درصد تغییرات پارامترهای $\alpha$ و $\theta_s$ در مدل ون گنوختن را تبیین کردند. در نهایت این محققین نشان دادند PTFهای ایجاد شده، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را بهتر از رزتا برآورد می‌کنند.

Saxton و همکاران (۱۹۸٦) از ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک برای بدست آوردن هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(\theta)$ و منحنی رطوبتی خاک $h(\theta)$ استفاده کردند. ایشان توابعی انتقالی بدست آوردند که می‌توان با استفاده از آنها تابعی پیوسته و دقیق از هدایت هیدرولیکی و منحنی رطوبتی آب خاک برای محدوه ای گسترده‌ای از بافت خاک استفاده کرد.

Islam و همکاران (۲۰۰٦) از سه روش رگرسیونی، شبکه عصبی مصنوعی (رزتا) و برازش بهینه به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار *RETC*، برای برآورد مشخصات هیدرولیکی خاک (منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و منحنی رطوبتی خاک) استفاده کردند. آنها، سپس این مشخصات را به مدل هیدرولوژیکی MIKE SHE وارد کردند و شبیه‌سازی رطوبت خاک را به مدت سه سال بررسی کردند. نتایج نشان داد روش رگرسیونی نتایج مختلفی نسبت به دو روش رزتا و *RETC* داشته و حساس به درصد بالای شن و رس می‌باشد.

Salazar و همکاران (۲۰۰۸)، جریان زهکشی را با استفاده از هدایت هیدرلیکی اشباع برآورد شده توسط رزتا ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی جریان زهکشی با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع برآورده شده با رزتا، با مقادیر شبیه‌سازی جریان زهکشی با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در خاک های بافت‌های درشت مشابه می‌باشد.

همچنین، در بیشتر مطالعات انجام شده در ایران منحنی رطوبتی برآورد شده با توابع انتقالی، با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده (شاخه خشک شدن) مقایسه گردیده است. در صورتی که شاخه خشک شدن بیشتر در فرآیند هایی مثل زهکشی کاربرد دارد در حالیکه در مدل کردن مسایل آبیاری و انتقال املاح، شاخه تر شدن به فیزیک مسئله نزدیک‌تر است. مقایسه منحنی رطوبتی برآورد شده، با منحنی اندازه‌گیری شده ممکن است نتیجه مناسبی در پی داشته باشد ولی به علّت پدیده پس‌ماند، حرکت آب و املاح را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نکند. لذا در این پژوهش، افزون بر ارزیابی دقت توابع انتقالی مختلف در برآورد منحنی رطوبتی، کارآمدی برآوردهای حاصل از برخی توابع انتقالی با مقیاس منطقه‌ای و بین المللی در مدل کردن تغییرات رطوبت در خاک توسط برنامه HYDRUS-1Dبررسی گردید.

**مواد و روش‌ها**

در این پژوهش تغییرات رطوبت خاک در یک زمین آیش واقع در روستای آقبلاق در استان اردبیل به مدت ۵۳ روز (۷ مرداد تا ۲۸ شهریور) و به صورت ۳ بار در هفته اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها در اعماق موثر ۱۵، ٤٥ و۷۵ سانتی‌متر (که به ترتیب معرف اعماق ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ٦۰ و ٦۰ تا ۹۰ سانتی‌متری بود) صورت گرفت. برخی از اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه برای ماه‌های مرداد و شهریور در جدول ۱ ارایه شده است.

[1] Rosetta

جدول۱- برخی از اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

| ماه | بارندگی ماهانه (mm) | تبخیر و تعرق ماهانه (mm) | رطوبت نسبی (٪) | دمای هوا (°C) |
|---|---|---|---|---|
| مرداد | ۱۲/۲۵ | ۱۸/۴۵ | ۶۵/۵ | ۱۷/۹ |
| شهریور | ۱۷/۷ | ۱۱/۸۵ | ۷۷/۲۵ | ۱۷/۳ |

برای نمونه‌برداری از یک مته لوله‌ای با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر حدود ۱۰ سانتی‌متر که یک سوم طولی لوله برش یافته و لبه آن تیز گردیده بود، استفاده شد. با کوبیدن مته در خاک از عمق‌های مختلف نمونه‌برداری گردید. رطوبت خاک داخل مته به تفکیک عمق با خشک کردن در آون اندازه‌گیری و تغییرات زمانی رطوبت در عمق‌های مختلف بدست آمد.

جرم ویژه ظاهری با استفاده از استوانه‌های نمونه برداری (Blake and Hartge, 1986)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Jacob and Clarke, 2002)، مواد آلی به روش والکی و بلک اصلاح شده (Nelson and Somers, 1982)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($K_s$) به روش بار افتان و منحنی رطوبتی با استفاده از دستگاه صفحه فشاری در مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال و ستون آب آویزان در مکش‌های کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد (Jacob and Clarke, 2002). برخی از ویژگی‌های خاک برای سه عمق مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است.

جدول۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد مطالعه

| بافت خاک | عمق (cm) | ماده آلی (٪) | جرم ویژه ظاهری ($gcm^{-3}$) | رس (٪) | سیلت (٪) | شن (٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| رسی | ۱۵ | ۲/۵۴ | ۱/۱ | ۵۷ | ۳۷ | ۶ |
| رسی | ۴۵ | ۱/۹۷ | ۱/۳ | ۶۰ | ۳۷ | ۳ |
| رسی | ۷۵ | ۲/۱۷ | ۱/۳ | ۵۷ | ۳۹ | ۴ |

با اینکه خاک در هر سه عمق مورد مطالعه، بافتی سنگین دارد، عمق ۴۵ سانتی‌متری مقدار رس بیشتری دارد که می‌تواند ناشی از آبشویی رس باشد (جدول ۲). همچنین، خاک در اعماق پایین‌تر، متراکم‌تر است. برای کمّی کردن توابع هیدرولیکی از مدل منحنی رطوبتی van Genuchten (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی غیر اشباع van Genuchten-Mualem (۱۹۷۶) استفاده گردید:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} \quad \text{و} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \qquad (۱)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1-(1-S_e^{1/m})^m\right]^2 \qquad (۲)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad (۳)$$

پارامترهای این مدل‌ها شامل $\theta_s$ و $\theta_r$ به‌ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقیمانده در خاک، $n$ و $\alpha$ ضرایب مدل، $h$ پتانسیل آب خاک در رطوبت $\theta$ و $K_s$ هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.

با برازش مدل ون‌گنوختن به منحنی رطوبتی اندازه-گیری شده توسط RETC (van Genuchten *et al.*, 1980)، مقدار پارامترهای n، $\alpha$، $\theta_r$ و $\theta_s$ محاسبه گردید. پارامترهای مدل ون‌گنوختن به عنوان ورودی کد HYDRUS-1D (Simunek, 2005) استفاده گردید. کد HYDRUS-1D نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی یک بعدی حرکت آب و املاح در خاک براساس حل عددی معادله دیفرانسیلی ریچاردز است (Simunek, 2005). مقادیر رطوبت اولیه، به عنوان شرایط اولیه با اندازه‌گیری درجا تعیین شد. مقدار بارش از اطلاعات هواشناسی و مقدار تبخیر و تعرق از روش تورنث وایت محاسبه گردید (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۸). با در نظر گرفتن اطلاعات یاد شده، با استفاده از HYDRUS-1D تغییرات رطوبت (از ۷ مرداد تا ۲۸ شهریور) شبیه‌سازی گردید. افزون بر منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده، از منحنی رطوبتی برآورد شده توسط توابع انتقالی به عنوان ورودی کد HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت استفاده گردید.

در این پژوهش از دو مجموعه توابع انتقالی بین‌المللی (مانند توابع Soilpar و Rosetta)، که با مجموعه داده‌های

وسیعی از خاک‌های مناطق مختلف جهان اشتقاق یافته‌اند و به صورت یک بسته نرم‌افزاری درآمده و کاربردی جهانی یافته‌اند، و برخی توابع انتقالی منطقه‌ای، که بر اساس داده‌های نسبتا محدود گردآوری شده از خاک‌های برخی مناطق ایران ایجاد شده بودند، استفاده گردید. این توابع در زیر معرفی شده‌اند، ولی به دلیل شمار زیاد توابع از ذکر روابط مربوط به توابع خودداری شده است. برای دسترسی به این روابط خوانندگان می‌توانند به منابع ذکر شده مراجعه نمایند.

نرم‌افزار سویل پار (Acutis and Donatella, 2003)، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را براساس توابع انتقالی رگرسیونی برآورد می‌کند. این نرم افزار از تابع انتقالی وریکن برای برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن استفاده می‌کند. ورودی‌های این نرم‌افزار شامل، جرم ویژه ظاهری و توزیع اندازه‌ی ذرات خاک می‌باشد.

نرم افزار رزتا با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی Schaap و همکاران (۲۰۰۱) می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند پارامترهای مدل منحنی‌رطوبتی آب خاک van Genuchten (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی van Genuchten-Mualem (۱۹۷٦) را با شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت قابل قبولی برآورد کند. رزتا با بکارگیری درصد شن، سیلت، رس و همچنین جرم ویژه ظاهری، پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن را برآورد می‌کند. در این پژوهش، پارامترهای منحنی رطوبتی یک بار فقط با داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک (SSC) و بار دیگر با داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک و جرم ویژه ظاهری (SSCBD) برآورد گردید.

همچنین، با استفاده از توابع انتقالی وستن (۲۰۰۱ و ۱۹۹۹) براساس ویژگی‌های زودیافت جرم ویژه ظاهری، درصد ماده آلی و درصد رس و سیلت، پارامترهای هیدرولیکی خاک برآورد گردید.

از توابع انتقالی منطقه‌ای ایجاد شده برای خاک‌های کشور، مدل اول و دوم قربانی دشتکی و همایی (۱۳۸۱) ، توابع پارامتریک نوع اول و دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۸۸)، مدل سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲) و توابع اصلاح شده قربانی دشتکی و همایی و توابع اصلاح شده سپاسخواه و بندار توسط موذن زاده و همکاران (۱۳۸۸) که بعد از این با عناوین قربانی-۱، قربانی-۲، یعقوبی-۱، یعقوبی-۲، قربانی اصلاح شده و سپاسخواه اصلاح شده بیان خواهد شد، مورد بررسی قرار گرفتند. در مدل قربانی -۱ و یعقوبی -۱ از متغیرهای جرم ویژه ظاهری و درصد رس و شن استفاده شده است و در مدل قربانی -۲ و یعقوبی -۲ علاوه بر جرم ویژه ظاهری، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات نیز بکار رفته است. میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با توجه به درصد رس، سیلت و شن خاک و با استفاده از روابط ارایه شده توسط Shirazi., و Boersma (۱۹۸٤) محاسبه می‌گردند. در مدل سپاسخواه از متغیرهای جرم ویژه ظاهری، درصد ماده آلی، درصدهای رس، سیلت و شن استفاده شده است. در توابع اصلاح شده قربانی دشتکی و همایی، توسط موذن‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) از متغیرهای جرم ویژه ظاهری، درصد ماده آلی، درصدهای رس، شن، سیلت، اسیدیته (pH) خاک، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک استفاده شده است. در توابع اصلاح شده سپاسخواه و بندار به وسیله موذن‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) نیز متغیرهای درصد ماده آلی، درصدهای رس و شن، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک بکار رفته است.

برای بررسی اعتبار توابع انتقالی و ارزیابی دقت جریان آب شبیه‌سازی شده با کاربرد توابع انتقالی خاک از معیارهای آماری میانگین خطا (*ME*)، شاخص همخوانی اصلاح شده (*d*) و جذر میانگین مربعات خطا (*RMSE*) استفاده شد: (ملکیان و قیصری، ۱۳۹۰؛ سرایی تبریزی،

۱۳۹۱؛ فلامکی و اسکندری، ۱۳۹۱؛ آبابایی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Oi - Si) \quad (٤)$$

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|O_i - S_i\right|}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|S_i - \overline{O}\right| + \left|O_i - \overline{O}\right|\right)} \quad (٥)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2} \quad (٦)$$

که در آنها $O_i$ مقادیر اندازه گیری شده، $S_i$ مقادیر برآورد شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه گیری شده و $n$ تعداد زوج مقادیر اندازه گیری شده- برآورد شده رطوبت می‌باشد. در ارزیابی توابع انتقالی، مقدار بهینه‌سازی شده پارامترها که از برنامه RETC بدست آمده بود به عنوان مقدار اندازه گیری شده پنداشته شد. در ارزیابی کاربردی توابع انتقالی، جریان آبی که به ترتیب با وارد کردن مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده با توابع انتقالی پارامترها، شبیه‌سازی شده بودند به عنوان مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده در نظر گرفته شدند ME بیانگر راستای خطاست، به طوریکه با توجه به رابطه (۳)، مقادیر منفی و مثبت آن به ترتیب بیانگر بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل است و مقدار آن هر چه به صفر نزدیکتر باشد مدل مناسب‌تر است. همخوانی اصلاح شده، که محدوده شاخص d بین صفر تا یک است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، برآوردها با خطای کمتری با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌روند هستند (Salazar *et al.*, 2008). مقدار RMSE نشان دهنده مقدار متوسط مطلق خطاست و هرچه به صفر نزدیکتر باشد، برآوردها دقیق‌ترند.

## نتایج و بحث

### بررسی توانایی توابع انتقالی پارامتریک مورد بررسی در برآورد مقدار پارامترهای منحنی رطوبتی خاک

ویژگی‌های هیدرولیکی حاصل از توابع انتقالی مختلف همراه با مقادیر برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری با RETC در جدول ۳ ارایه شده است. از بین توابع انتقالی بررسی شده برای برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی، مقادیر برآورد شده توسط توابع قربانی-۱ و رزتا (SSCBD) و تابع یعقوبی-۲ به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیکتر بودند. برآوردهای توابع وستن (۱۹۹۷، ۱۹۹۹) و رزتا (SSC) نیز نسبتاً به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک بودند.

تابع وستن (۲۰۰۱) مقدار پارامتر $\alpha$ را خیلی کم ($^{-۸}$ ۱۰×۸) برآورد کرد. نرم‌افزار سویل پار مقادیر پارامتر $\alpha$ و $n$ را خیلی کم برآورد کرد (جدول ۳). مدل قربانی-۲ نیز مقدار پارامتر $n$ را در هر سه عمق بسیار زیادتر از گستره متداول آن برآورد کرد (جدول ۳).

### ارزیابی کمّی اعتبار توابع انتقالی پارامتریک مورد بررسی در برآورد منحنی رطوبتی خاک

به‌منظور مقایسه عملکرد توابع انتقالی مورد بررسی در برآورد منحنی رطوبتی خاک، با وارد کردن مقادیر پارامترهای منحنی رطوبتی (جدول ۳) به مدل ون‌گنوختن، رطوبت خاک در مکش‌هایی که رطوبت در آنها اندازه‌گیری شده بود، برآورد گردید. سپس، این مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده به طور کمّی مقایسه شد (جدول٤). توابع قربانی-۱، رزتا (SSCBD) و وستن (۱۹۹۷) با کمترین مقدار RMSE (۰/۰۱٤ و ۰/۰۲۵ و ۰/۰٤۵) و ME (۰/۰۰۰٤- و ۰/۰۰٦- و ۰/۰۱٤-) و بیشترین مقدار d (۰/۹۳ و۰/۸٤و ۰/٦۷)، اعتبار بالاتری در برآورد منحنی رطوبتی خاک سطحی (عمق ۱۵ سانتی‌متری) داشتند (جدول ٤). همچنین، توابع رزتا (SSC)، وستن (۱۹۹۹) و یعقوبی-۱ نیز به ترتیب با مقادیر d (۰/٦۵، ۰/٦۵، ۰/۵۷) و مقادیر RMSE (۰/۰۵۱، ۰/۰۵٤، ۰/۰۷۸) اعتبار نسبتاً مناسبی نشان دادند. با اینکه توابع قربانی-۱، قربانی-۲ و

یعقوبی-۲ دقتی نسبی در برآورد منحنی رطوبتی خاک تحتانی داشتند، تمامی توابع در برآورد منحنی رطوبتی در خاک زیرسطحی (اعماق ٤٥ و ٧٥ سانتی‌متری)، اعتباری اندک داشتند (جدول ٤). به احتمال زیاد چون این توابع عموما با داده‌هایی از خاک سطحی اشتقاق یافته‌اند، برای خاک‌های سطحی و نه زیرسطحی اعتبار دارند. به طور کلی از بین توابع مورد بررسی تابع سپاسخواه اصلاح شده و سویل پار (وریکن) کمترین دقت را در برآورد منحنی رطوبتی داشتند (جدول ٤).

Nemes و همکاران (۲۰۰۳) به این نتیجه دست یافتند که دقت توابع انتقالی که مقادیر RMSE آنها بین ۰/۰٦٥ تا ۰/۰۷ است، برای اهداف خاص رضایت‌بخش می‌باشد. این محققین بیان کردند به دلیل اختلاف کم در RMSE، می‌توان توابع انتقالی با مقیاس بین المللی را جایگزینی برای توابع انتقالی با مقیاس ملی و مقادیر اندازه‌گیری کرد.

جدول۳- مقدار برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامترهای مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن

| توابع مورد استفاده | عمق ۱۵ سانتیمتر | | | | عمق ۴۵ سانتیمتر | | | | عمق ۷۵ سانتیمتر | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\theta_r$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\theta_s$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\alpha$ ($cm^{-1}$) | n (-) | $\theta_r$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\theta_s$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\alpha$ ($cm^{-1}$) | n (-) | $\theta_r$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\theta_s$ ($cm^3cm^{-3}$) | $\alpha$ ($cm^{-1}$) | n (-) |
| RETC# | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۵۸۶ | ۰/۰۲ | ۱/۳ | ۰ | ۰/۵۸۸ | ۰/۰۰۹۷ | ۱/۳ | ۰ | ۰/۵۱۳ | ۰/۰۱۳ | ۱/۳ |
| ریتن ۱۹۹۷ | ۰ | ۰/۵۷۴ | ۰/۰۸۷ | ۱/۱ | ۰ | ۰/۵۱۵ | ۰/۰۸۵ | ۱/۰۶ | ۰ | ۰/۵۱۸ | ۰/۰۸۹ | ۱/۰۶ |
| ریتن ۱۹۹۹ | ۰ | ۰/۵۷۴ | ۰/۰۱۴ | ۱/۱ | ۰ | ۰/۵۱۵ | ۰/۰۱۲ | ۱/۰۷ | ۰ | ۰/۵۱۸ | ۰/۰۱۳ | ۱/۰۷ |
| ریتن ۲۰۰۱ | ۰ | ۰/۵۹ | $8\times10^{-4}$ | ۱/۲ | ۰ | ۰/۵۰۰ | ۰/۰۱۲ | ۱/۰۷ | ۰ | ۰/۵۰۴ | ۰/۰۱۳ | ۱/۰۷ |
| رزتا (SSC) | ۰/۱۰۴ | ۰/۵۱۱ | ۰/۰۱۶ | ۱/۲ | ۰/۱۰۵ | ۰/۵۱۸ | ۰/۰۱۷ | ۱/۲ | ۰/۱۰۵ | ۰/۵۱۷ | ۰/۰۱۶ | ۱/۲ |
| رزتا (SSCBD) | ۰/۱۰۹ | ۰/۵۷۸ | ۰/۰۲ | ۱/۲ | ۰/۱۰۴ | ۰/۵۱۸ | ۰/۰۱۷ | ۱/۲ | ۰/۱۰۴ | ۰/۵۲۳ | ۰/۰۱۷ | ۱/۳ |
| سویل پار (وریکن) | ۰/۳۲ | ۰/۵۷۴ | ۰ | ۰/۴۸ | ۰/۳۲ | ۰/۵۱۵ | ۰ | ۰/۴۷ | ۰/۳۲ | ۰/۵۱۸ | ۰ | ۰/۴۹ |
| قریباری-۱ | ۰/۲۳۱ | ۰/۵۸۶ | ۰/۰۲۱ | ۱/۶ | ۰/۲۴۳ | ۰/۵۲۶ | ۰/۰۰۵ | ۱/۶۴ | ۰/۱۷۱ | ۰/۵۲۴ | ۰/۰۰۵ | ۱۱/۱۳ |
| قریباری-۲ | ۰/۲۶۸ | ۰/۵۸۸ | ۰/۰۱۷ | ۱۱/۷ | ۰/۱۷۸ | ۰/۵۲۴ | ۰/۰۰۵ | ۱۱/۰۴ | ۰/۱۷۱ | ۰/۵۳۰ | ۰/۰۰۵ | ۱۱/۱۳ |
| قریباری اصلاح شده | ۰/۰۷۹ | ۰/۷۴۴ | ۰/۱۰۴ | ۲/۰۶ | ۲/۳ | ۰/۷۴۴ | ۰/۱۴۸ | ۲/۳ | ۰/۰۶۲ | ۰/۷۸۷ | ۰/۱۱۳ | ۲/۲۵ |
| بخودی-۱ | ۰/۱۲۱ | ۰/۵۹۸ | ۰/۰۴۸ | ۱/۴ | ۰/۱۲۸ | ۰/۵۹۶ | ۰/۰۱۴ | ۱/۳۱ | ۰/۱۲۲ | ۰/۵۹۲ | ۰/۰۱۹ | ۱/۳۳ |
| بخودی-۲ | ۰/۱۲۸ | ۰/۶۵۵ | ۰/۰۱ | ۱/۴ | ۰/۱۳۹ | ۰/۶۳۳ | ۰/۰۰۹ | ۱/۳۹ | ۰/۱۰۶ | ۰/۶۱۷ | ۰/۰۰۵ | ۱/۳۹ |
| سپاسخواه | ۰/۲۵۲ | ۰/۵۷۴ | ۰/۰۴۲ | ۲/۱ | ۰/۲۷۶ | ۰/۵۱۵ | ۰/۰۲۶ | ۱/۷۳ | ۰/۲۲۹ | ۰/۵۱۸ | ۰/۰۳۲ | ۱/۷۹ |
| سپاسخواه اصلاح شده | ۰/۲۵۷ | ۰/۵۷۴ | ۱/۰۷ | ۲/۳۴ | ۰/۲۸۹ | ۰/۵۱۵ | ۰/۷۱۲ | ۳/۱۱ | ۰/۲۷۵ | ۰/۵۱۸ | ۰/۷۸ | ۲/۹ |

# منظور مقدار بهینه‌سازی شده پارامترهاست که با برازش مدل منحنی رطوبتی به داده‌های اندازه‌گیری شده، توسط RETC بدست آمده است.

با این حال Nemes و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد دادند، به علت عدم اطمینان بالای توابع انتقالی، بهتر است توابع انتقالی را برای خاک، مدل و کاربری خاص اراضی مجدداً ارزیابی کرد. در توابع انتقالی بررسی شده در این پژوهش،

مقدار RMSE توابع قربانی-۱، رزتا (SSC و SSCBD)، یعقوبی-۱ و وستن (۱۹۹۷، ۱۹۹۹) برای عمق ۱۵ سانتی-متر در محدوده گستره رضایت‌بخش پیشنهادی توسط Nemes و همکاران (۲۰۰۳) بود (جدول ۴). مقدار RMSE سایر توابع مورد بررسی، بیانگر توانایی کم آنها در برآورد رطوبت‌های نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری می‌باشد (جدول ۴). همچنین، نتایج این پژوهش با یافته‌های خداوردیلو و همکاران (۱۳۹۰) که بیان داشتند ارزیابی اعتبار توابع انتقالی از نظر برآورد پارامترها یا منحنی رطوبتی خاک ممکن است متفاوت باشد، همخوانی داشت.

فولادمند و هادی‌پور (۱۳۹۰)، نشان دادند که تابع پارامتریک وستن و همکاران مناسب‌ترین تابع برای تخمین منحنی رطوبتی خاک‌های مورد بررسی در استان فارس بود. نتایج این تحقیق با نتایج موذن‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) نیز همخوانی داشت. موذن‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) سه تابع انتقالی قربانی -۱، قربانی -۲ و سپاسخواه را در برآورد منحنی رطوبتی در تعدادی از خاک‌های کشور ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که توابع قربانی -۱ و قربانی -۲ در برآورد رطوبت در تمام بازه پتانسیل ماتریک، یکسان و تقریباً مناسب عمل می‌کنند.

## ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در شبیه‌سازی جریان آب در خاک

شکل ۱ شبیه‌سازی تغییرات رطوبت نسبت به زمان با کد HYDRUS-1D را با در نظر گرفتن منحنی رطوبتی برآورد شده توسط توابع انتقالی نشان می‌دهد. در این شکل، S-M بیانگر تغییرات رطوبت شبیه‌سازی شده توسط HYDRUS-1D می‌باشد که با وارد کردن مقدار بهینه‌سازی شده پارامترها حاصل از برازش مدل منحنی رطوبتی به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط RETC بدست آمده است. از بین توابع بررسی شده، توابع وستن (۱۹۹۷،۱۹۹۹) و تابع قربانی اصلاح شده در مقایسه با سایر توابع انتقالی، مناسب‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک (تغییرات رطوبت نسبت به زمان) داشتند (شکل ۱).

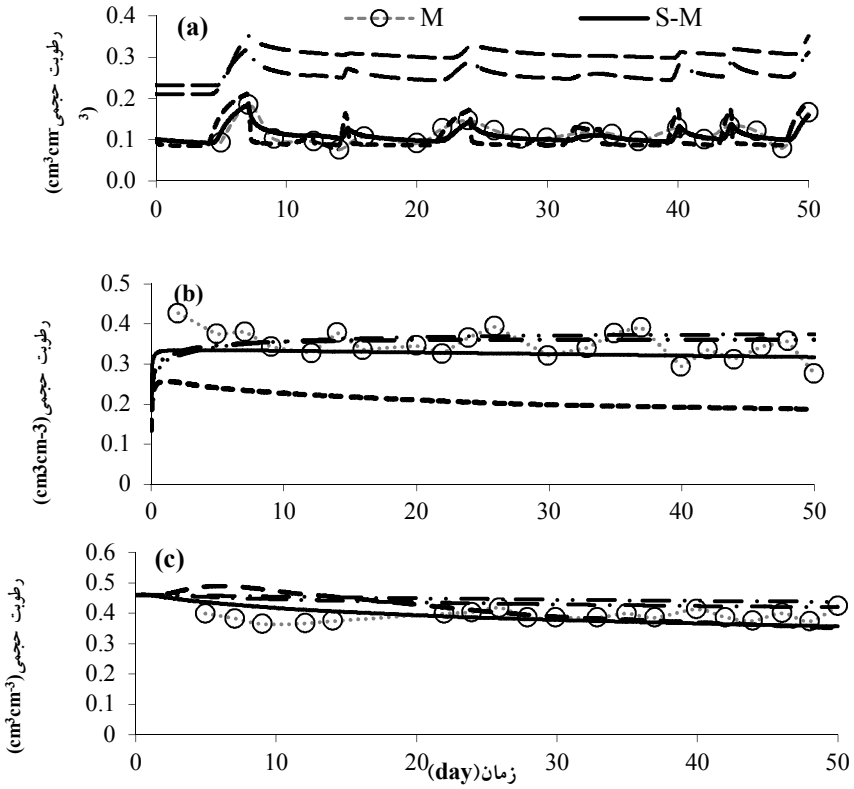
جدول ٤- مقدار محاسبه شده جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و شاخص همخوانی اصلاح شده (d) برای ارزیابی کمّی اعتبار توابع انتقالی پارامتریک مورد مطالعه در برآورد رطوبت خاک در منطقه مورد بررسی

| توابع انتقالی | RMSE ($cm^3cm^{-3}$) | | | d | | | ME ($cm^3cm^{-3}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| منحنی رطوبتی | ۷۵ | ۴۵ | ۱۵ | ۷۵ | ۴۵ | ۱۵ | ۷۵ | ۴۵ | ۱۵ |
| وستن۱۹۹۷ | ۰/۱۲۳ | ۰/۱۲۵ | ۰/۰۴۵ | ۰/۳۱۲ | ۰/۲۹۰ | ۰/۶۷۱ | ۰/۰۹۹ | ۰/۰۹۸ | -۰/۰۱۴ |
| وستن ۱۹۹۹ | ۰/۱۰۷ | ۰/۱۱ | ۰/۰۵۴ | ۰/۳۲۸ | ۰/۲۹۴ | ۰/۶۵۳ | ۰/۰۶۹ | ۰/۰۷۱ | -۰/۰۳۴ |
| وستن ۲۰۰۱ | ۰/۱۱۶ | ۰/۱۲۰ | ۰/۱۱۶ | ۰/۳۱۳ | ۰/۲۸۱ | ۰/۳۸۳ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۸۶ | -۰/۰۶۷ |
| رزتا (SSC) | ۰/۱۱۲ | ۰/۱۰۹ | ۰/۰۵۱ | ۰/۴۱۸ | ۰/۴۱۰ | ۰/۶۴۸ | ۰/۱۰۳ | ۰/۱۰۰ | -۰/۰۳۹ |
| رزتا (SSCBD) | ۰/۱۰۹ | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۲۵ | ۰/۴۲۴ | ۰/۴۱۷ | ۰/۸۴۰ | ۰/۱۰۲ | ۰/۱۰۵ | -۰/۰۰۶ |
| سویل‌پار (وریکن) | ۰/۱۲۶ | ۰/۱۳ | ۰/۱۲۴ | ۰/۱۵۲ | ۰/۱۳۱ | ۰/۳۸۹ | ۰/۰۴۵ | ۰/۰۴۹ | -۰/۰۸۱ |
| قربانی-۱ | ۰/۰۸۴ | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۱۴ | ۰/۴۷۵ | ۰/۴۳۹ | ۰/۹۲۸ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۸۲ | -۰/۰۰۰۴ |
| قربانی-۲ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۸۲ | ۰/۱۴۴ | ۰/۴۹۴ | ۰/۵۰۵ | ۰/۵۴۸ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۷۴ | ۰/۰۶۹ |
| قربانی اصلاح شده | ۰/۳۳۰ | ۰/۳۵۶ | ۰/۲۳۹ | ۰/۲۷۴ | ۰/۲۵۲ | ۰/۳۳۷ | ۰/۲۶۸ | ۰/۲۸۷ | ۰/۱۸۷۴ |
| یعقوبی-۱ | ۰/۱۴۰ | ۰/۱۳۵ | ۰/۰۷۸ | ۰/۳۶۱ | ۰/۳۷ | ۰/۵۶۷ | ۰/۱۳۳ | ۰/۱۲۷ | ۰/۰۷۴ |
| یعقوبی-۲ | ۰/۱۳۱ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۴۳ | ۰/۳۸۳ | ۰/۳۶۲ | ۰/۷۴۱ | ۰/۱۲۱ | ۰/۱۳۴ | -۰/۰۰۴ |
| سپاسخواه | ۰/۱۵۳ | ۰/۱۳۸ | ۰/۰۸۷ | ۰/۳۳۴ | ۰/۳۵۴ | ۰/۵۷۴ | ۰/۱۴۴ | ۰/۱۳۲ | ۰/۰۷۵ |
| سپاسخواه اصلاح شده | ۰/۲۸۸ | ۰/۲۷۸ | ۰/۲۲۳ | ۰/۱۹۵ | ۰/۱۸۸ | ۰/۲۷۹ | ۰/۲۶۴ | ۰/۲۵۰ | ۰/۲۰۴ |

تمامی توابع در شبیه‌سازی جریان آب در خاک در خاک زیرسطحی (اعماق ٤٥ و ۷۵ سانتی‌متری)، اعتباری اندک

داشتند (شکل ۱). به احتمال زیاد چون توابع پارامتریک عموما با داده‌هایی از خاک سطحی اشتقاق یافته‌اند، برای خاک‌های سطحی و نه زیرسطحی اعتبار دارند.

عملکرد توابع وستن (۱۹۹۷،۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده در برآورد جریان آب در خاک به طور کمّی مقایسه شد (جدول ۵). مقایسه معیارهای آماری عمق ۱۵ نشان داد منحنی رطوبتی برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط RETC (S-M) و قربانی اصلاح شده به ترتیب با کمترین مقدار RMSE (۰/۰۱۳ و ۰/۰۲۵) و ME (۰/۰۸- و ۰/۰۰۲-) و بیشترین مقدار d (۰/۷۱ و ۰/۶۳۳) بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک ارایه کردند و دو تابع وستن (۱۹۹۷) و وستن (۱۹۹۹) ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک نشان دادند، به طوری که مقادیر d آنها به ترتیب (۰/۰۹و ۰/۱۲) بدست آمد. مقایسه معیارهای آماری در اعماق زیرین (۴۵ و ۷۵ سانتی‌متری) بیانگر عملکرد ضعیف توابع انتقالی در شبیه-سازی جریان آب در خاک زیرسطحی بود. با این حال معیارهای آماری نشان دادند که، منحنی رطوبتی برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط RETC (S-M) با d (۰/۳۸) شبیه‌سازی نسبتاً مناسبتری نسبت به توابع انتقالی وستن (۱۹۹۷) و وستن (۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده با d (۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۱۶) داشت. مقایسه معیارهای آماری عمق ۷۵ نیز بیانگر عملکرد ضعیف توابع در شبیه-سازی جریان آب در خاک می‌باشد به‌طوری که تابع انتقالی قربانی اصلاح شده با d (۰/۴۷) بیشترین دقت را برای مدل کردن آب در خاک را نشان داد.




شکل ۱- شبیه‌سازی تغییرات زمانی رطوبت خاک برای اعماق ۱۵ (a)، ۴۵ (b) و ۷۵(c) سانتی‌متر. *M*: رطوبت اندازه گیری شده، *S-M*، *S-W(1997)*، *S-W(1999)* و S-Gh&H(Adj.): رطوبت شبیه‌سازی شده با HYDRUS-1D به ترتیب با بکارگیری منحنی رطوبتی برازش یافته به مقادیر اندازه‌گیری شده با RETC و برآورد شده با توابع انتقالی وستن (۱۹۹۷)، وستن (۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده.

به طور کلی، مقدار RMSE در توابعی که قادر به شبیه-سازی جریان آب در خاک بودند، کمتر از حد بالایی گستره رضایت‌بخش پیشنهادی توسط Nemes و همکاران (۲۰۰۳) ($0.065$ $cm^3cm^{-3}$ تا ۰/۰۷) بود که نشان‌دهنده اعتبار کاربردی نسبی توابع انتقالی مختلف در شبیه‌سازی جریان آب در خاک است (جدول ۵).

جدول ۵- مقدار محاسبه شده جذر میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، میانگین خطا (*ME*) و شاخص همخوانی اصلاح شده ($d$) برای ارزیابی کمّی اعتبار کاربردی توابع انتقالی منحنی رطوبتی در شبیه‌سازی جریان آب در اعماق مختلف خاک منطقه مورد مطالعه

| توابع انتقالی منحنی رطوبتی[#] | RMSE ($cm^3cm^{-3}$) | | | d | | | ME ($cm^3cm^{-3}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۷۵ | ٤٥ | ۱۵ | ۷۵ | ٤٥ | ۱۵ | ۷۵ | ٤٥ | ۱۵ |
| S-M | ۰/۰۳٤ | ۰/۰٤۰ | ۰/۰۱۳ | ۰/۲۱ | ۰/۳۸ | ۰/۷۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۳ | -۰/۰۸ |
| *S-W (1999)* | ۰/۰۵۸ | ۰/۰٤٦ | ۰/۱٤۹ | ۰/۱۹ | ۰/۲۰ | ۰/۱۲ | -۰/۰۵۵ | -۰/۰۱٤ | -۰/۱٤۹ |
| *S-W (1997)* | ۰/۰٤۷ | ۰/۰٤ | ۰/۱۹٦ | ۰/۲٤ | ۰/۱۵ | ۰/۰۹ | -۰/۰٤۲ | -۰/۰۰۷ | -۰/۱۹۵ |
| *S-Gh&H (Adj.)* | ۰/۰۵۵ | ۰/۱٤٤ | ۰/۰۲۵ | ۰/٤۷ | ۰/۱٦ | ۰/٦۳ | -۰/۰۱٦ | ۰/۱٤۱ | -۰/۰۰۲ |

[#]: *S-M* و *S-W(1997)*، *S-W(1999)* و S-Gh&H(Adj.): رطوبت شبیه‌سازی شده با HYDRUS-1D به ترتیب با بکارگیری منحنی رطوبتی برازش یافته به مقادیر اندازه‌گیری شده با RETC و برآورد شده با توابع انتقالی وستن (۱۹۹۷)، وستن (۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده.

**نتیجه‌گیری کلی**

کارآیی PTFهایی با مقیاس‌های منطقه‌ای و بین‌المللی در برآورد منحنی رطوبتی و شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک ارزیابی شد. گو اینکه دقیق‌ترین PTF در برآورد منحنی رطوبتی خاک مورد مطالعه از بین توابع منطقه‌ای بود، برخی توابع بین‌المللی در برآورد منحنی رطوبتی خاک از بیشتر توابع منطقه‌ای کارآمدتر بودند.

نوع ارزیابی اعتبار توابع انتقالی می‌تواند به قضاوتی متفاوت در مورد کارآیی PTFها بیانجامد. بطوریکه، در این پژوهش، بهترین توابع انتقالی برای برآورد منحنی رطوبتی خاک، تابع قربانی-۱ و رزتا (SSCBD) بودند، در حالیکه برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک توابع وستن (۱۹۹۷،۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده، کارآیی بهتری داشتند. تابع قربانی اصلاح شده در برآورد منحنی رطوبتی دقت نسبتاً متوسطی داشت، امّا شبیه‌سازی جریان آب در خاک را با دقت نسبتا بالایی انجام داد.

این مطالعه همچنین نشان داد که باید اعتبار برآورد PTFها با توجه به نوع کاربردی که قرار است از PTFها داشته باشیم و گستره $\theta(h)$ موثر در رفتار مورد بررسی از خاک، آزموده شود. به دیگر سخن، در مقایسه با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده، برخی PTFها منحنی رطوبتی خاک را با دقتی مناسب برآورد کردند، ولی در شبیه‌سازی جریان آب در خاک کارآمد نبودند. این یافته را می‌توان چنین توجیه کرد: جریان آب و بازتوزیع رطوبت در خاک، بویژه در خاک آیش و شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک مورد مطالعه، در گستره‌ای محدود از $\theta(h)$ و عموماً در دنباله خشک منحنی رطوبتی (رطوبت در مکش‌های بیش از ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) رخ می‌دهد. لذا ممکن است PTFی به طور کلی منحنی رطوبتی را با دقتی مناسب برآورد کند اما در برآورد بخشی از منحنی رطوبتی که در شبیه‌سازی جریان آب در آن خاک تاثیر بیشتری دارد (در این مطالعه بخش خشک منحنی رطوبتی)، کارآمد نباشد و از این رو قادر به بازآفرینی شرایط واقعی حاکم بر فرایند توزیع رطوبت در آن خاک نباشد. به عنوان شاهدی بر این ادعا، اکثر PTFهایی که در شبیه‌سازی رطوبت خاک در این مطالعه ناکارآمد بودند، مقدار رطوبت باقیمانده را بیشتر از حد واقعی و عموماً بیش از رطوبت اولیه موجود در خاک در شرایط توزیع رطوبت، برآورد کردند. لذا در ارزیابی PTFهای منحنی رطوبتی برای استفاده در شبیه‌سازی

رفتارهای خاص از خاک مانند جریان آب در خاک باید گستره $\theta(h)$ مورد مقایسه با محدوده $\theta(h)$ موثر در رفتار مورد نظر از خاک همپوشانی داشته باشد.

همچنین، مشخص گردید که توابع انتقالی بین‌المللی ممکن است اعتباری مشابه با توابع انتقالی منطقه‌ای در برآورد رطوبت خاک یا شبیه‌سازی جریان آب در خاک داشته باشند. نتایج ما نشان داد که خطای ناشی از مقیاس اشتقاق PTFها، منبع اصلی خطا در مدل‌های شبیه‌سازی نیست و خطای PTFها ممکن است توسط خطای ناشی از سایر منابع پوشانده شود

**فهرست منابع**


آبابایی، ب.، سرائی تبریزی، م.، فرهادی بانسوله، ب.، سهرابی، ت. و میرزایی، ف. ۱۳۹۱. ارزیابی واسنجی مدل CERES-Barley با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس تحت شرایط کم‌آبیاری. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۲): ۳۷– ٤٨.

خداوردی‌لو، ح.، قربانی دشتکی، ش.، نریمانی، ز. و شهنازی، ا. ۱۳۹۰. ارزیابی کاربردی توابع انتقالی پارامتریک در برآورد رطوبت در برخی خاک‌های آهکی. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. تبریز، ۱۲ الی ١٤ شهریور.

خداوردی‌لو، ح . و م . همایی. ۱۳۸۱ . اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی . مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۳.(۱۰): ٤٧–۳۵.

سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری گیاه سویا با استفاده از مدل BUDGET. حفاظت منابع آب و خاک، ۱ (۳): ٤٧– ۵۸.

علیزاده، ا.، کمالی، غ.، موسوی، ف. و موسوی بایگی، م. ۱۳۸۸. هوا و اقلیم‌شناسی. دانشگاه فردوسی مشهد. شماره ۱۸۲.

فلامکی، ا. و اسکندری، م. ۱۳۹۱. تخمین ضریب توزیع خاک–آب فلزات سنگین با کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۲۵– ۳٦.

فولادمند، ح. و هادی‌پور، س. ۱۳۹۰. ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۵۸): ۳۷–۲۵.

ملکیان ر. و قیصری م. ۱۳۹۰. حساسیت سنجی مدل CSM-CERES-Maize نسبت به ظرفیت زراعی خاک برای شبیه سازی سرنوشت نیتروژن در نیمرخ خاک. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۱(۲): ۱–۱۳.

موذن‌زاده، ر.، قهرمان، ب.، داوری، ک. و خشنود یزدی، ع. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد چند تابع انتقالی داخلی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی، نشریه آب و خاک، ۲۳ (٤): ۵۵–٦٦.

نوری، م.، همایی، م. و بای‌بوردی، م. ۱۳۹۱ (الف). ارزیابی پارامتریک توانایی نگهداشت خاک در حضور نفت خام در حالت سه فازی. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۲): ۱۵– ۲٤.

نوری، م.، همایی، م. و بای‌بوردی، م. ۱۳۹۱ (ب). بررسی پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور آلاینده نفت سفید. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۳۷– ٤٨.

یعقوبی، ع. و رسول‌زاده، ع. ۱۳۸۸. ایجاد توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد منحنی رطوبتی خاک. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ٢٤ الی٢٦ آذر .

Acutis, M., Donatella, M., 2003. Soil par 2: software to estimate soil hydrological parameters and functions. Europe. J. Agron. 18: 373-377.

Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. P 363-375, In: Klute, A. (Ed), Methods of soil analysis. Part 1. 2 nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.

Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Adv. Soil Sci. Soc. Am. J. 9: 177-213 .

Ghorbani Dashtaki, S., Homaee, M., Khodaverdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. Soil Use Manage. 26 (1): 68-74.

Islam, N., Wall ender, W.W., Mitchell, J.P. Wicks, S., Hewitt, R.E. 2006. Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrological model. Geoderma, 134:135-151.

Jacob, H., Clarke, G. 2002. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Method. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

Shirazi, M. A. L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Science Society American Journal, 48: 142-147.

Šimůnek, M. Th. van Genuchten and M. Šejna. 2005. Department of environmental sciences University of California Riverside. P:1-240

van Genuchten M.Th., Leij F.J., and Yates S.R. 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic functions of Unsaturated Soils Office of research and development U. S. Environmental Protection Agency ADA, Oklahoma.

van Genuchten, M. Th., and P. J. Wierenga. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions. Soil Science Society American Journal, 40: 473-481.

van Genuchten, M. Th. 1980. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Proceeding SSSA, 44: 892-898.

Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37: 29-39.

Wösten, J.H.M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science, vol. 25, Elsevier, Amsterdam, pp.221-245.

Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C. 1999. Development and use of a data base of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90: 169-185.

Wösten, J.H.M., Pachepsky, Ya.A, Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of Hydrology, 251:123-150.

Khodaverdiloo, H., Homaee, M., van Genuchten, M. Th., Ghorbani Dashtaki, Sh. 2011. Deriving and Validating Pedotransfer Functions for some Calcareous Soils. J. Hydrol. 399: 93-99.

Larson, W. E. and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil qualify. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world Vol.2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management. IBSRAM proceeding No. 12 (2): 175-204 .

Nelson, D. W., Somers, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L. (Ed.), Methods of soil analysis. Part2. Second ed. Agron. Monogr. 9. Soil Science Society American Journal, Madison, I, pp. 539-579.

Nemes, A., Schaap, M.G., and Wösten, J.H.M. 2003. Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales of Data Collection. Soil Science Society American Journal, 67: 1093-1102.

Salazar, O., Wesstrom, I., Joel, A. 2008. Evaluation of Drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. Agricultural. Water Management, 95: 1135-1143.

Saxton, K.E., Rawls, W.J, Romberger, J. S., Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. Soil Science Society American Journal, 50: 1031-1036.

Schaap, M. G., A. Nemes, and M. Th. van Genuchten. 2004. Comparison of Models for Indirect Estimation of Water Retention and Available Water in Surface Soils. Vadose Zone Journal, 3:1455-1463.

Schaap, M.G., Leij , F.J ., van Genuchten , M.Th. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology, 251: 163–176.

ISSN 2251-7480

# Evaluating some pedotransfer functions for simulation of transient water flow in soil

**Sanam Jafari Gilandeh[1], Ali Rasoulzadeh[2] and Habib Khodaverdiloo[3*]**

1) M.Sc. student, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia 57135-165, Iran
2) Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3*) Assistant Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia 57135-165, Iran,
Corresponding author email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

Received: 07-12-2012 Accepted: 14-05-2013

**Abstract**

Quantitative description of soil hydraulic properties is necessary for any scheduling related to soil and water resources conservation. Soil hydraulic properties are important inputs for simulation of water flow and solute transport in soil. Since direct measurement of these properties is time consuming and costly, pedotransfer functions (PTFs) have been widely and successfully used for their prediction. Yet, little efforts have been made for functional evaluation of PTFs predictions for application in simulating transient soil water flow. In this study, soil water retention curve (SWRC) of a clay soil was predicted, using some selected local and global PTFs. SWRC was also measured in the laboratory by direct method. Validity of studied PTFs in terms of prediction of SWRC was examined. By applying both predicted and measured hydraulic parameters to HYDRUS-1D program for simulation of soil water flow, functional behavior of PTFs was quantitatively compared in terms of simulation of water flow in soil. The obtained results indicated that both the selected global PTFs (Rosetta) with root mean square error (RMSE) < 0.025 $cm^3cm^{-3}$ and some regional PTFs (Ghorbani-1) with RMSE < 0.014 $cm^3cm^{-3}$ can reasonably well predict SWRC of soil surface. For prediction of SWRC of subsurface soil, the RMSE value of global PTFs was larger than 0.107 $cm^3cm^{-3}$ and was ranged from 0.036 to 0.356 $cm^3cm^{-3}$ for the local PTFs. However, for simulation of soil water flow a different set of PTFs was most efficient. RMSE values of adjusted Ghorbani PTF (*S-Gh&H (Adj.)*) for simulation of water content of surface and subsurface soils were 0.025 and 0.055 $cm^3cm^{-3}$, respectively. RMSE value of Wosten (1997, 1999) PTFs for surface soil was larger than 0.149 $cm^3cm^{-3}$ and for subsurface soil was less than 0.058 $cm^3cm^{-3}$. Simulation with the measured SWRC had RMSE values of 0.013-0.040 $cm^3cm^{-3}$ for surface and subsurface soils, respectively. It can be concluded that when validating PTFs, one should consider the objective for which the PTFs are assessed. A PTF might be accurate enough for predicting SWRC, but not for particular $\theta(h)$ range governing the soil water redistribution process. Using such PTFs might lead to large errors in simulating soil water content.

**Keywords:** functional evaluation; pedotransfer functions; soil water flow; simulation models