

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

صنم جعفری گیلانده<sup>۱</sup>، علی رسول‌زاده<sup>۲</sup> و حبیب خداوردیلو<sup>۳\*</sup>

(۱) دانشجوی 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](mailto:h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۱۶

### چکیده

بیان کمی 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 محلی 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 کمی مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هر دو PTF جهانی (رزتا) با میانگین مربعات خطای (RMSE) کمتر از  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.025$  و برخی PTFهای منطقه‌ای (قربانی-۱) با  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.014 < \text{RMSE}$ ، می‌توانند منحنی رطوبتی خاک سطحی را به گونه‌ای مناسب برآورد کنند. برای برآورد منحنی رطوبتی خاک زیرسطحی مقدار RMSE برای توابع جهانی بزرگتر از  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.107$  و برای توابع محلی در محدوده  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.356 - 0.036$  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  $0.025$  و  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.055$  بود. مقدار RMSE توابع وستن (۱۹۹۹، ۱۹۹۷) نیز برای خاک سطحی بزرگتر از  $0.149$  و برای خاک زیرسطحی کوچکتر از  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.058$  بود. مقدار RMSE شبیه‌سازی شده با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای خاک سطحی و زیرسطحی به ترتیب  $0.013$  تا  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$   $0.040$  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 گسترده 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

پارامترهای معادلات تجربی- تئوریک روابط (h) و یا (K) را به ویژگی‌های خاک ارتباط می‌دهند که می‌توان با انتقال این توابع به معادلات ذکر شده مقادیر K را در هر مقدار از h یا به دست آورد. این روش در مدل‌سازی انتقال آب و املاح در خاک برتری دارد، زیرا نتایج به دست آمده از آن برخلاف روش قبلی، تابعی پیوسته از روابط (h) و یا (K) است (Wosten, Bouma, 1989). 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; خدادوردیلو 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، ملی و بین‌المللی ایجاد کرد. برخی از توابع بین‌المللی مثل رزتا و سویل‌پار<sup>۲</sup> کاربردی گسترده یافته‌اند. با این حال عموماً PTFها ابزاری برای درون‌یابی هستند و برای منطقه‌ای که در آن ایجاد شده‌اند نتایج بهتری ارائه 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 ملی یا منطقه‌ای و حتی به جای اندازه-گیری مستقیم استفاده کرد.

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 کمی 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<sup>۱</sup> (PTF) برای برآورد منحنی رطوبتی (خدادوردی لو ۱۳۸۱؛ Ghorbani Dashtaki et al., 2010) و هدایت هیدرولیکی (Khodaverdiloo et al., 2011) 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 کلی PTFهای کلاسی و PTFهای پیوسته شده است. PTFهای کلاسی مقادیری میانگین و تقریبی از ویژگی‌های و پارامترهای دیریافت برای کلاس-های بافتی ویژه ارائه می‌دهند. PTFهای پیوسته ویژگی‌های خاک مانند فراوانی نسبی ذرات، درصد مواد آلی و جرم ویژه ظاهری خاک را به عنوان متغیرهای رگرسیونی در نظر می‌گیرند و ممکن است برای برآورد هر نقطه دلخواه از روابط 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،

<sup>2</sup> Soilpar<sup>1</sup> Pedotransfer Functions

Salazar و همکاران (۲۰۰۸)، جریان زهکشی را با استفاده از هدایت هیدرولیکی 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 خاک‌های 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 فرآیند‌هایی 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 علت 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 بین‌المللی در مدل کردن تغییرات رطوبت در خاک توسط برنامه HYDRUS-ID بررسی 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، ۴۵ و ۷۵ سانتی‌متر (که به ترتیب معرف اعماق ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری بود) صورت گرفت. برخی از اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه برای ماه‌های مرداد و شهریور در جدول ۱ ارائه شده است.

Ghorbani و همکاران (۲۰۰۹)، ۲۳۴ نمونه خاک را با توزیع اندازه ذرات متفاوت به صورت تصادفی جمع‌آوری 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 پارامتریکی، برای برآورد منحنی رطوبتی ایجاد کردند. همچنین، دقت PTFهای ایجاد شده را با توابع رزتا<sup>۱</sup> مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ورودی‌های گروه دوم ۶۵ تا ۹۰ درصد تغییرات پارامترهای  $s$  و 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 (۱۹۸۶) از ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک برای بدست آوردن هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $K(h)$  و منحنی رطوبتی خاک  $h$  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 محدوده‌ای گسترده‌ای از بافت خاک استفاده کرد.

Islam و همکاران (۲۰۰۶) 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.

<sup>1</sup> Rosetta

جدول ۱- برخی از اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

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

برای نمونه برداری 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 نمونه برداری گردید. رطوبت خاک داخل مته به تفکیک عمق با خشک کردن در آن 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.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد مطالعه

| بافت<br>خاک | عمق<br>(cm) | ماده<br>آلی<br>(%) | جرم ویژه<br>ظاهری<br>(gcm <sup>-3</sup> ) | رس<br>(%) | سیلت<br>(%) | شن<br>(%) |
|-------------|-------------|--------------------|---|-----------|-------------|-----------|
| 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 آبخوبی رس باشد (جدول ۲). همچنین، خاک در اعماق پایین‌تر، متراکم‌تر است. برای کمی کردن توابع هیدرولیکی از مدل منحنی رطوبتی van Genuchten (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی غیر اشباع van Genuchten-Mualem (۱۹۷۶) استفاده گردید:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (1)$$

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

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

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

با برازش مدل ون‌گنوختن به منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط RETC (van Genuchten et al., 1980)، مقدار پارامترهای  $n$ ،  $r$ ،  $s$  و 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 تورنت 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

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 ارائه شده توسط Shirazi, و Boersma (۱۹۸۴) 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 موذن زاده 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 موذن زاده 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؛ سربابی تبریزی،

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 نسبتاً 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 منحنی رطوبتی آب خاک van Genuchten (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی van Genuchten-Mualem (۱۹۷۶) 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.

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

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad (4)$$

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (6)$$

ویژگی‌های هیدرولیکی حاصل از توابع انتقالی مختلف همراه با مقادیر برازش داده شده به مقادیر اندازه‌گیری با RETC در جدول ۳ ارائه 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 ( $10^{-8}$ ) برآورد کرد. نرم‌افزار سویل 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 کمی اعتبار توابع انتقالی پارامتریک مورد بررسی

##### در برآورد منحنی رطوبتی خاک

به منظور 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 کمی مقایسه شد (جدول ۴). توابع قربانی-۱، رزتا (SSCBD) و وستن (۱۹۹۷) با کمترین مقدار RMSE (۰/۰۱۴، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴۵) و ME (۰/۰۰۰۴، -۰/۰۰۰۶ و -۰/۰۱۴) و بیشترین مقدار  $d$  (۰/۹۳ و ۰/۸۴ و ۰/۶۷)، اعتبار بالاتری در برآورد منحنی رطوبتی خاک سطحی (عمق ۱۵ سانتی‌متری) داشتند (جدول ۴). همچنین، توابع رزتا (SSC)، وستن (۱۹۹۹) و یعقوبی-۱ نیز به ترتیب با مقادیر  $d$  (۰/۶۵، ۰/۶۵، ۰/۵۷) و مقادیر RMSE (۰/۰۵۱، ۰/۰۵۴، ۰/۰۷۸) اعتبار نسبتاً مناسبی نشان دادند. با اینکه توابع قربانی-۱، قربانی-۲ و

که در آنها  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S_i$  مقادیر برآورد شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده- برآورد شده رطوبت می‌باشد. در ارزیابی توابع انتقالی، مقدار بهینه‌سازی شده پارامترها که از برنامه RETC بدست آمده بود به عنوان مقدار اندازه‌گیری 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 هر چه به صفر نزدیکتر باشد، برآوردها دقیق‌ترند.

#### نتایج و بحث

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

سویل پار (وریکن) کمترین دقت را در برآورد منحنی رطوبتی داشتند (جدول ۴).  
Nemes و همکاران (۲۰۰۳) به این نتیجه دست یافتند که دقت توابع انتقالی که مقادیر RMSE آنها بین ۰/۰۶۵ 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.

یعقوبی-۲ دقتی نسبی در برآورد منحنی رطوبتی خاک تحتانی داشتند، تمامی توابع در برآورد منحنی رطوبتی در خاک زیرسطحی (اعماق ۴۵ و ۷۵ سانتی‌متری)، اعتباری اندک داشتند (جدول ۴). به احتمال زیاد چون این توابع عموماً 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

جدول ۳- مقدار برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامترهای مدل منحنی رطوبتی ون‌گونختن

| توابع مورد استفاده | عمق ۱۵ سانتیمتر                             |   |                                  |            |                | عمق ۴۵ سانتیمتر                             |   |                                  |            |                | عمق ۷۵ سانتیمتر                             |   |                                  |            |                |
|--------------------|---|---|----------------------------------|------------|----------------|---|---|----------------------------------|------------|----------------|---|---|----------------------------------|------------|----------------|
|                    | $\theta_r$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta_s$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\alpha$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | $n$<br>(-) | $\beta$<br>(-) | $\theta_r$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta_s$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\alpha$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | $n$<br>(-) | $\beta$<br>(-) | $\theta_r$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta_s$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\alpha$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | $n$<br>(-) | $\beta$<br>(-) |
| RETIC              | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۷                           | ۱/۳        | ۰              | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۷                           | ۱/۳        | ۰              | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۳                                      | ۰/۰۰۰۷                           | ۱/۳        | ۰              |
| ریش ۱۴۸۷           | ۰   | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۸۴                           | ۱/۰/۶      | ۰              | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۰۸۵                           | ۱/۰/۶      | ۰              | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۸۴                           | ۱/۰/۶      | ۰              |
| ریش ۱۴۸۴           | ۰   | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۱۳                           | ۱/۰/۷      | ۰              | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۰۱۲                           | ۱/۰/۷      | ۰              | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۱۳                           | ۱/۰/۷      | ۰              |
| ریش ۲۰۰۱           | ۰   | ۰/۰۵۰۴                                      | ۰/۰۰۱۳                           | ۱/۰/۷      | ۰              | ۰/۰۵۰۰                                      | ۰/۰۵۰۰                                      | ۰/۰۰۱۲                           | ۱/۰/۷      | ۰              | ۰/۰۵۰۴                                      | ۰/۰۵۰۴                                      | ۰/۰۰۱۳                           | ۱/۰/۷      | ۰              |
| روزنا (SSC)        | ۰/۱۰۰۵                                      | ۰/۰۵۱۷                                      | ۰/۰۰۱۳                           | ۱/۲        | ۰/۱۰۰۵         | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۱۷                           | ۱/۲        | ۰/۱۰۰۵         | ۰/۰۵۱۷                                      | ۰/۰۰۱۳                                      | ۱/۲                              | ۰/۱۰۰۵     | ۰/۰۵۱۷         |
| روزنا (SSCBD)      | ۰/۱۰۰۴                                      | ۰/۰۵۲۳                                      | ۰/۰۰۱۷                           | ۱/۳        | ۰/۱۰۰۴         | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۱۷                           | ۱/۳        | ۰/۱۰۰۴         | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۰۱۷                           | ۱/۳        | ۰/۱۰۰۴         |
| سویل پار (وریکن)   | ۰/۳۲  | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰                                | ۰/۴۴       | ۰/۳۲           | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰                                | ۰/۴۴       | ۰/۳۲           | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰                                | ۰/۴۴       | ۰/۳۲           |
| قویبی-۱            | ۰/۳۳۳                                       | ۰/۰۳۲۲                                      | ۰/۰۰۶                            | ۱/۶        | ۰/۳۳۳          | ۰/۰۳۲۲                                      | ۰/۰۰۵                                       | ۱/۶                              | ۰/۳۳۳      | ۰/۰۳۲۲         | ۰/۰۰۵                                       | ۱/۶   | ۰/۳۳۳                            | ۰/۰۳۲۲     | ۰/۰۰۵          |
| قویبی-۲            | ۰/۱۷۰                                       | ۰/۰۳۰                                       | ۰/۰۰۵                            | ۱/۱/۳      | ۰/۱۷۰          | ۰/۰۳۰                                       | ۰/۰۰۵                                       | ۱/۱/۳                            | ۰/۱۷۰      | ۰/۰۳۰          | ۰/۰۰۵                                       | ۱/۱/۳                                       | ۰/۱۷۰                            | ۰/۰۳۰      | ۰/۰۰۵          |
| قویبی اصلاح شده    | ۰/۰۶۲                                       | ۰/۰۸۷                                       | ۰/۱۱۳                            | ۲/۱۵       | ۰/۰۶۲          | ۰/۰۸۶                                       | ۰/۱۸۸                                       | ۲/۳                              | ۰/۰۶۲      | ۰/۰۸۶          | ۰/۱۸۸                                       | ۲/۳   | ۰/۰۶۲                            | ۰/۰۸۶      | ۰/۱۸۸          |
| یعقوبی-۱           | ۰/۱۲۲                                       | ۰/۰۴۸۲                                      | ۰/۰۰۱۹                           | ۱/۳۳       | ۰/۱۲۲          | ۰/۰۴۸۲                                      | ۰/۰۰۱۴                                      | ۱/۳۳                             | ۰/۱۲۲      | ۰/۰۴۸۲         | ۰/۰۰۱۴                                      | ۱/۳۳  | ۰/۱۲۲                            | ۰/۰۴۸۲     | ۰/۰۰۱۴         |
| یعقوبی-۲           | ۰/۱۰۶                                       | ۰/۰۴۸۷                                      | ۰/۰۰۵                            | ۱/۳۹       | ۰/۱۰۶          | ۰/۰۴۸۷                                      | ۰/۰۰۴                                       | ۱/۳۹                             | ۰/۱۰۶      | ۰/۰۴۸۷         | ۰/۰۰۴                                       | ۱/۳۹  | ۰/۱۰۶                            | ۰/۰۴۸۷     | ۰/۰۰۴          |
| سپاسخواه           | ۰/۲۲۹                                       | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۳۲                            | ۱/۷۹       | ۰/۲۲۹          | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۳۶                                       | ۱/۷۳                             | ۰/۲۲۹      | ۰/۰۵۱۵         | ۰/۰۳۶                                       | ۱/۷۳  | ۰/۲۲۹                            | ۰/۰۵۱۵     | ۰/۰۳۶          |
| سپاسخواه اصلاح شده | ۰/۲۷۵                                       | ۰/۰۵۱۸                                      | ۰/۰۸                             | ۲/۴        | ۰/۲۷۵          | ۰/۰۵۱۵                                      | ۰/۰۷۲                                       | ۳/۱۱                             | ۰/۲۷۵      | ۰/۰۵۱۵         | ۰/۰۷۲                                       | ۳/۱۱  | ۰/۲۷۵                            | ۰/۰۵۱۵     | ۰/۰۷۲          |

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

انتقالی را برای خاک، مدل و کاربری خاص اراضی مجدداً ارزیابی کرد. در توابع انتقالی بررسی شده در این پژوهش،

با این حال Nemes و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد دادند، به علت عدم اطمینان بالای توابع انتقالی، بهتر است توابع

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،

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

جدول ۴- مقدار محاسبه شده جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و شاخص همخوانی اصلاح شده (d) برای ارزیابی کمی اعتبار توابع انتقالی پارامتریک مورد مطالعه در برآورد رطوبت خاک در منطقه مورد بررسی

| توابع انتقالی<br>منحنی رطوبتی | ME (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) |       |       | d     |       |       | RMSE (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) |       |       |
|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|
|                               | ۱۵                                     | ۴۵    | ۷۵    | ۱۵    | ۴۵    | ۷۵    | ۱۵                                       | ۴۵    | ۷۵    |
| وستن ۱۹۹۷                     | -۰/۰۱۴                                 | ۰/۰۹۸ | ۰/۰۹۹ | ۰/۶۷۱ | ۰/۲۹۰ | ۰/۳۱۲ | ۰/۰۴۵                                    | ۰/۱۲۵ | ۰/۱۲۳ |
| وستن ۱۹۹۹                     | -۰/۰۳۴                                 | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۶۹ | ۰/۶۵۳ | ۰/۲۹۴ | ۰/۳۲۸ | ۰/۰۵۴                                    | ۰/۱۱  | ۰/۱۰۷ |
| وستن ۲۰۰۱                     | -۰/۰۶۷                                 | ۰/۰۸۶ | ۰/۰۸۲ | ۰/۳۸۳ | ۰/۲۸۱ | ۰/۳۱۳ | ۰/۱۱۶                                    | ۰/۱۲۰ | ۰/۱۱۶ |
| رزتا (SSC)                    | -۰/۰۳۹                                 | ۰/۱۰۰ | ۰/۱۰۳ | ۰/۶۴۸ | ۰/۴۱۰ | ۰/۴۱۸ | ۰/۰۵۱                                    | ۰/۱۰۹ | ۰/۱۱۲ |
| رزتا (SSCBD)                  | -۰/۰۰۶                                 | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۰۲ | ۰/۸۴۰ | ۰/۴۱۷ | ۰/۴۲۴ | ۰/۰۲۵                                    | ۰/۱۱۱ | ۰/۱۰۹ |
| سویل‌پار (وریکن)              | -۰/۰۸۱                                 | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۴۵ | ۰/۳۸۹ | ۰/۱۳۱ | ۰/۱۵۲ | ۰/۱۲۴                                    | ۰/۱۳  | ۰/۱۲۶ |
| قربانی-۱                      | -۰/۰۰۰۴                                | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۶۶ | ۰/۹۲۸ | ۰/۴۳۹ | ۰/۴۷۵ | ۰/۰۱۴                                    | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۸۴ |
| قربانی-۲                      | ۰/۰۶۹                                  | ۰/۰۷۴ | ۰/۰۶۵ | ۰/۵۴۸ | ۰/۵۰۵ | ۰/۴۹۴ | ۰/۱۴۴                                    | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۸۱ |
| قربانی اصلاح شده              | ۰/۱۸۷۴                                 | ۰/۲۸۷ | ۰/۲۶۸ | ۰/۳۳۷ | ۰/۲۵۲ | ۰/۲۷۴ | ۰/۲۳۹                                    | ۰/۳۵۶ | ۰/۳۳۰ |
| یعقوبی-۱                      | ۰/۰۷۴                                  | ۰/۱۲۷ | ۰/۱۳۳ | ۰/۵۶۷ | ۰/۳۷  | ۰/۳۶۱ | ۰/۰۷۸                                    | ۰/۱۳۵ | ۰/۱۴۰ |
| یعقوبی-۲                      | -۰/۰۰۴                                 | ۰/۱۳۴ | ۰/۱۲۱ | ۰/۷۴۱ | ۰/۳۶۲ | ۰/۳۸۳ | ۰/۱۴۳                                    | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۳۱ |
| سپاسخواه                      | ۰/۰۷۵                                  | ۰/۱۳۲ | ۰/۱۴۴ | ۰/۵۷۴ | ۰/۳۵۴ | ۰/۳۳۴ | ۰/۰۸۷                                    | ۰/۱۳۸ | ۰/۱۵۳ |
| سپاسخواه اصلاح شده            | ۰/۲۰۴                                  | ۰/۲۵۰ | ۰/۲۶۴ | ۰/۲۷۹ | ۰/۱۸۸ | ۰/۱۹۵ | ۰/۲۲۳                                    | ۰/۲۷۸ | ۰/۲۸۸ |

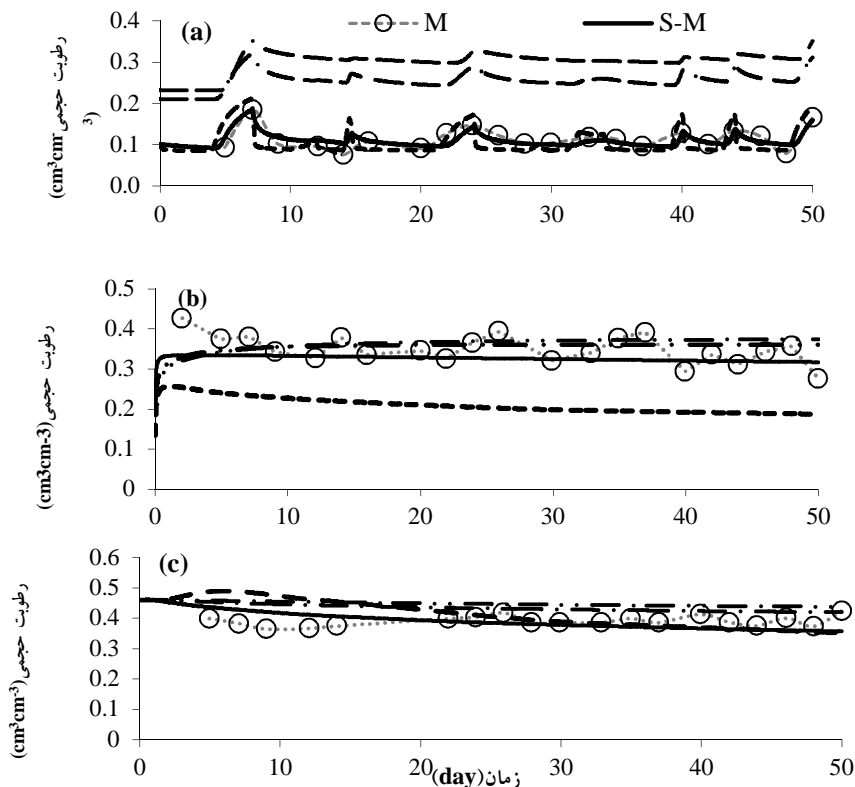
تمامی توابع در شبیه‌سازی جریان آب در خاک در خاک زیرسطحی (اعماق ۴۵ و ۷۵ سانتی‌متری)، اعتباری اندک

مناسب‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک (تغییرات رطوبت نسبت به زمان) داشتند (شکل ۱).



به طوری که مقادیر  $d$  آنها به ترتیب  $(0/09 و 0/12)$  بدست آمد. مقایسه معیارهای آماری در اعماق زیرین  $(45 و 75$  سانتی‌متری) بیانگر عملکرد ضعیف توابع انتقالی در شبیه‌سازی 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  $d (0/38)$  شبیه‌سازی نسبتاً مناسبتری نسبت به توابع انتقالی وستن  $(1997)$  و وستن  $(1999)$  و قربانی اصلاح شده با  $d (0/15, 0/20, 0/16)$  داشت. مقایسه معیارهای آماری عمق  $75$  نیز بیانگر عملکرد ضعیف توابع در شبیه‌سازی جریان آب در خاک می‌باشد به طوری که تابع انتقالی قربانی اصلاح شده با  $d (0/47)$  بیشترین دقت را برای مدل کردن آب در خاک را نشان داد.

داشتند (شکل ۱). به احتمال زیاد چون توابع پارامتریک عموماً با داده‌هایی از خاک سطحی اشتقاق یافته‌اند، برای خاک‌های سطحی و نه زیرسطحی اعتبار دارند. عملکرد توابع وستن  $(1997, 1999)$  و قربانی اصلاح شده در برآورد جریان آب در خاک به طور کمی مقایسه شد (جدول ۵). مقایسه معیارهای آماری عمق  $15$  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  $(0/13 و 0/25)$  و ME  $(-0/08 و -0/02)$  و بیشترین مقدار  $d (0/71 و 0/633)$  بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک ارایه کردند و دو تابع وستن  $(1997)$  و وستن  $(1999)$  ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی جریان آب در خاک نشان دادند.



شکل ۱- شبیه‌سازی تغییرات زمانی رطوبت خاک برای اعماق  $15$  (a)،  $45$  (b) و  $75$  (c) سانتی‌متر.  $M$ : رطوبت اندازه‌گیری شده،  $S-M$ ،  $S-W(1997)$ ،  $S-W(1999)$ ،  $S-Gh\&H(Adj.)$ : 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  $(1997)$ ، وستن  $(1999)$  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 رضایت بخش پیشنهادی توسط Nemes و همکاران

(۲۰۰۳) ( $0.065 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  تا  $0.07$ ) بود که نشان دهنده اعتبار کاربردی نسبی توابع انتقالی مختلف در شبیه سازی 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 کمی اعتبار کاربردی توابع انتقالی منحنی رطوبتی در شبیه سازی جریان آب در اعماق مختلف خاک منطقه مورد مطالعه

| توابع انتقالی منحنی رطوبتی # |       |       | RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) |      |      | d    |        |        | ME ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) |    |    |    |
|------------------------------|-------|-------|--|------|------|------|--------|--------|--------------------------------------|----|----|----|
|                              | ۱۵    | ۴۵    | ۷۵                                     | ۱۵   | ۴۵   | ۷۵   | ۱۵     | ۴۵     | ۷۵                                   | ۱۵ | ۴۵ | ۷۵ |
| S-M                          | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۴۰ | ۰/۰۳۴                                  | ۰/۷۱ | ۰/۳۸ | ۰/۲۱ | -۰/۰۸  | ۰/۰۲۳  | ۰/۰۰۲                                |    |    |    |
| S-W (1999)                   | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۵۸                                  | ۰/۱۲ | ۰/۲۰ | ۰/۱۹ | -۰/۱۴۹ | -۰/۰۱۴ | -۰/۰۵۵                               |    |    |    |
| S-W (1997)                   | ۰/۱۹۶ | ۰/۰۴  | ۰/۰۴۷                                  | ۰/۰۹ | ۰/۱۵ | ۰/۲۴ | -۰/۱۹۵ | -۰/۰۰۷ | -۰/۰۴۲                               |    |    |    |
| S-Gh&H (Adj.)                | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۵۵                                  | ۰/۶۳ | ۰/۱۶ | ۰/۴۷ | -۰/۰۰۲ | ۰/۱۴۱  | -۰/۰۱۶                               |    |    |    |

# S-M و S-W (1997) و S-Gh&H (Adj.) رطوبت شبیه سازی شده با HYDRUS-1D به ترتیب با بکارگیری منحنی رطوبتی

برازش یافته به مقادیر اندازه گیری شده با RETC و برآورد شده با توابع انتقالی وستن (۱۹۹۷)، وستن (۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده.

#### نتیجه گیری کلی

کارایی PTF هایی با مقیاس های منطقه ای و بین المللی در برآورد منحنی رطوبتی و شبیه سازی مقدار رطوبت خاک ارزیابی شد. گو اینکه دقیق ترین PTF در برآورد منحنی رطوبتی خاک مورد مطالعه از بین توابع منطقه ای بود، برخی توابع بین المللی در برآورد منحنی رطوبتی خاک از بیشتر توابع منطقه ای کارآمدتر بودند.

نوع ارزیابی اعتبار توابع انتقالی می تواند به قضاوتی متفاوت در مورد کارایی PTF ها بیانجامد. بطوریکه، در این پژوهش، بهترین توابع انتقالی برای برآورد منحنی رطوبتی خاک، تابع قربانی-۱ و رزتا (SSCBD) بودند، در حالیکه برای شبیه سازی جریان آب در خاک توابع وستن (۱۹۹۷، ۱۹۹۹) و قربانی اصلاح شده، کارایی بهتری داشتند. تابع قربانی اصلاح شده در برآورد منحنی رطوبتی دقت نسبتاً متوسطی داشت، اما شبیه سازی جریان آب در خاک را با دقت نسبتاً بالایی انجام داد.

این مطالعه همچنین نشان داد که باید اعتبار برآورد PTF ها با توجه به نوع کاربردی که قرار است از PTF ها داشته باشیم و گستره  $\theta(h)$  موثر در رفتار مورد بررسی از خاک،

آزموده شود. به دیگر سخن، در مقایسه با منحنی رطوبتی اندازه گیری شده، برخی PTF ها منحنی رطوبتی خاک را با دقتی مناسب برآورد کردند، ولی در شبیه سازی جریان آب در خاک کارآمد نبودند. این یافته را می توان چنین توجیه کرد: جریان آب و بازتوزیع رطوبت در خاک، بویژه در خاک آیش و شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک مورد مطالعه، در گستره ای محدود از  $\theta(h)$  و عموماً در دنباله خشک منحنی رطوبتی (رطوبت در مکش های بیش از ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) رخ می دهد. لذا ممکن است PTF ی به طور کلی منحنی رطوبتی را با دقتی مناسب برآورد کند اما در برآورد بخشی از منحنی رطوبتی که در شبیه سازی 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 PTF هایی که در شبیه سازی 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 PTF های منحنی رطوبتی برای استفاده در شبیه سازی

فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۵۸): ۲۵-۳۷.

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.

مؤذنزاده، 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 (۴): ۵۵-۶۶.

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): ۱۵-۲۴.

نوری، م.، همایی، م. و بای‌بوردی، م. ۱۳۹۱ (ب). بررسی پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور آلانده نفت سفید. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۳۷-۴۸.

یعقوبی، ع. و رسولزاده، ع. ۱۳۸۸. ایجاد توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد منحنی رطوبتی خاک. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ۲۴ الی ۲۶ 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., Homaaee, 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.*

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): ۳۷-۴۸.

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 ۱۴ شهریور.

خداوردی‌لو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۱. اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۳(۱۰): ۴۷-۳۵.

سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری گیاه سویا با استفاده از مدل BUDGET. حفاظت منابع آب و خاک، ۱ (۳): ۴۷-۵۸.

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): ۲۵-۳۶.

فولادمند، ح. و هادی‌پور، س. ۱۳۹۰. ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در استان

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

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

Sanam Jafari Gilandeh<sup>1</sup>, Ali Rasoulzadeh<sup>2</sup> and Habib Khodaverdiloo<sup>3\*</sup>

3+ "O0Uel"uwvfgpv."Fgrctv o gpv"qh"Uqkn"Uekgpeg."Wt okc" Wpkxgtukv{."Wt okc"79357/387."ktcp"  
 4+"Cuukwcpv"Rtqhgauqt."Fgrctv o gpv"qh"Y cvgt"Gpikpggkpi."Wpkxgtukv{"qh"Oqjci j g i j" Ct fcdknk."Ct fcdknk."ktcp"  
 5+"Cuukwcpv"Rtqhgauqt."Fgrctv o gpv"qh"Uqkn"Uekgpeg."Wt okc" Wpkxgtukv{."Wt okc"79357/387."ktcp."  
 Eqttgurqp fkp i "cwwjqt" g o ckn<" j 0 m j q f c x g t f k n q q B w t o k c l e e l k t ""

" Tgegkxgf<"29/34/4234" "Ceegrvgf<"36/27/4235

### Abstract

Swcpvkvcxg" fguetkrvkqp" qh"uqkn" j {ftcwnke" rtqrgtvkgu" ku" pgeguuct{ "hqt" cp{ "uejgfwkpi" tgnvcvf" vq"uqkn" cpf" ycvgt" tguqwtegu" eqpugtxcvkqp" Uqkn" j {ftcwnke" rtqrgtvkgu" ctg" k o rqtvcpv" kprwvu" hqt" uk o wncvkqp" qh" ycvgt" hmqy" cpf" uqnvvg" vtcpurqtv" kp" uqkn" Ukpeg" fktgev" o gcuwtg o gpv" qh" vjgug" rtqrgtvkgu" ku" vk o g" eqpuw o kpi" cpf" equvn{." rgfvqtcpuhgt" hwpevkqpu" \*RVHu" j c x g" dggp" ykfgn{ "cpf" uweeguuhwm{ "wugf" hqt" vjgk" rtgfkevkqp" [ gv." nkvnng" ghhtvu" j c x g" dggp" o c f g" hqt" hwpevkqpcn" gxcnwcvkqp" qh" RVHu" rtgfkevkqpu" hqt" cr r n k e c v k p" k p" u k o w n c v k p i" v t c p u k g p v" u q k n" y c v g t" h m q y" k p" v j k u" u w v f {." uqkn" ycvgt" tgvvpkqp" ewtxg" \*UYTE" qh" c" enc{ "uqkn" ycu" rtgfkevgf." wukp i" uq o g" ugngevgf" nqecn" cpf" inqdcn" RVHu" UYTE" ycu" cnuq" o gcuwtgf" kp" vjg" ncdqtevtq{ "d{ "fktgev" o gvj qf" Xcnkfkv{ "qh" uwwfkgf" RVHu" kp" vgt o u" qh" rtgfkevkqp" qh" UYTE" ycu" gzc o k p g f" D{ "c r r n { k p i" d q v j" r t g f k e v g f" c p f" o g c u w t g f" j { f t c w n k e" r e t c o g v g t u" v q" J [ F T W U / 3 F" r t q i t c o" hqt" uk o w n c v k p q h" u q k n" y c v g t" h m q y." h w p e v k q p c n" d g j c x k q t" q h" R V H u" y c u" s w c p v k v c x g n { " e q o r c t g f" k p" v g t o u" q h" u k o w n c v k p q h" y c v g t" h m q y" k p" u q k n" V j g" q d v k p g f" t g u w n v u" k p f k e c v g f" v j c v" d q v j" v j g" u g n g e v g f" i n q d c n" R V H u" \* T q u g v c + " y k v j" t q q v" o g c p" u s w c t g" g t t q t" \* T O U G + " >" 2 0 2 4 7" e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> c p f" u q o g" t g i k q p c n" R V H u" \* I j q t d c p k / 3 + " y k v j" T O U G " >" 2 0 2 3 6" e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> e c p" t g c u q p c d n { " y g m n" r t g f k e v" U Y T E" q h" u q k n" u w t h c e g" H q t" r t g f k e v k p q h" U Y T E" q h" u w d w t h c e g" u q k n." v j g" T O U G" x c n w g" q h" i n q d c n" R V H u" y c u" n c t i g t" v j c p" 2 0 3 2 9" e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> c p f" y c u" t c p i g f" h t q o" 2 0 2 5 8" v q" 2 0 5 7 8" e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> h q t" v j g" n q e c n" R V H u" J q y g x g t." h q t" u k o w n c v k p q h" u q k n" y c v g t" h m q y" c" f k h h g t g p v" u g v" q h" R V H u" y c u" o q u v" g h h k e k g p v" T O U G" x c n w g u" q h" c f l w u v g f" I j q t d c p k" R V H" \* S - G h & H ( A d j . ) + " h q t" u k o w n c v k p q h" y c v g t" e q p v g p v" q h" u w t h c e g" c p f" u w d w t h c e g" u q k n u" y g t g" 2 0 2 4 7" c p f" 2 0 2 7 7" e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> t g u r g e v k x g n { 0" T O U G" x c n w g" q h" Y q u v g p" \* 3 ; ; 9 . 3 ; ; + R V H u" h q t" u w t h c e g" u q k n" y c u" n c t i g t" v j c p" 2 0 3 6 ; " e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> c p f" h q t" u w d w t h c e g" u q k n" y c u" n g u u" v j c p" 2 0 2 7 : " e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> U k o w n c v k p q h" y k v j" v j g" o g c u w t g f" U Y T E" j c f" T O U G" x c n w g u" q h" 2 0 2 3 5 / 2 0 2 6 2 " e o <sup>5</sup> e o <sup>5</sup> h q t" u w t h c e g" c p f" u w d w t h c e g" u q k n u." t g u r g e v k x g n { 0" K v" e c p" d g" e q p e n w f g f" v j c v" y j g p" x c n k f c v k p i" R V H u." q p g" u j q w n f" e q p u k f g t" v j g" q d l g e v k x g" h q t" y j k e j" v j g" R V H u" c t g" c u u g u g f" 0" C" R V H" o k i j v" d g" c e e w t c v g" g p q w i j" h q t" r t g f k e v k p i" U Y T E." d w v" p q v" h q t" r c t k e w n c t"  $\theta(h)$  t c p i g" i q x g t p k p i" v j g" u q k n" y c v g t" t g f k u t k d w k q p" r t q e g u o" W u k p i" u w e j" R V H u" o k i j v" n g c f" v q" n c t i g" g t t q t u" k p" u k o w n c v k p i" u q k n" y c v g t" e q p v g p v" 0

**Keywords:** hwpevkqpcn" gxcnwcvkqp=" rgfvqtcpuhgt" hwpevkqpu=" uqkn" ycvgt" hmqy =" uk o wncvkqp" o qf gnu