



نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیستم، شماره چهارم، ۱۳۹۲  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ارزیابی توابع انتقالی در شبیه‌سازی شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع

\*علی رسول‌زاده<sup>۱</sup>، سکینه رضوی قلعه‌جوق<sup>۲</sup> و محمدرضا نیشابوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، <sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد  
گروه علوم خاک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، <sup>۳</sup>استاد گروه علوم خاک، دانشگاه تبریز، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۵

### چکیده

مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در ناحیه غیراشباع، مستلزم شناخت ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع آن می‌باشد. اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌های هیدرولیکی با استفاده از روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی که به نام روش‌های مستقیم شناخته شده‌اند بسیار پرهزینه و وقت‌گیر هستند. تعیین غیرمستقیم این ویژگی‌ها با استفاده از توابع انتقالی به‌عنوان جایگزین مناسب روش‌های مستقیم مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بیش‌تر در مطالعات مختلف از توابع انتقالی به‌منظور برآورد شاخه دفع آب منحنی مشخصه آب خاک استفاده می‌گردد. ارزیابی توابع انتقالی به‌منظور برآورد شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور در این مطالعه دقت نرم‌افزارهای رزتا، سویل‌پار، توابع انتقالی راولز و براکنسیک و سکستون و همکاران در برآورد شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک و همچنین هدایت هیدرولیکی غیراشباع مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روش صحرایی شانی، معروف به روش قطره‌چکان، استفاده شد. مقادیر معیارهای آماری شامل MAE، RMSE و E' به‌منظور مقایسه دقت توابع انتقالی در برآورد منحنی مشخصه جذب و هدایت هیدرولیکی غیراشباع مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج

\*مسئول مکاتبه: [rasoulzadeh@uma.ac.ir](mailto:rasoulzadeh@uma.ac.ir)

نشان داد منحنی مشخصه آب خاک شبیه‌سازی شده با توابع انتقالی ذکر شده، تطابق مناسبی با شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده ندارند. مقایسه مقادیر معیارهای آماری بیانگر آن بود که مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع کمپل و بروکز و کوری که پارامترهای آن با توابع انتقالی راولز و براکنسیک برآورد شده است عملکرد نسبی بهتری نسبت به سایر توابع انتقالی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** توابع انتقالی، شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک، هدایت هیدرولیکی غیراشباع

#### مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک مورد نیاز می‌باشند. در اندازه‌گیری و رسم منحنی مشخصه آب خاک عواملی مانند پدیده پسماند رطوبتی بر میزان آب نگهداری شده توسط خاک تأثیر می‌گذارند به طوری که منحنی مشخصه آب خاک در حالت از دست دادن آب (یا زه‌کشی یا واجذب و یا دفع آب) با منحنی مشخصه آب خاک در حالت مرطوب شدن (یا آبیاری یا جذب آب) بر یکدیگر منطبق نمی‌شوند. بسیاری از روش‌های آزمایشگاهی شاخه دفع آب منحنی مشخصه آب خاک را اندازه‌گیری می‌کنند در حالی که در طبیعت به منظور مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در داخل خاک در حالت غیراشباع، تعیین شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر مشکل ذکر شده، اندازه‌گیری مستقیم منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک پرهزینه، وقت‌گیر و دشوار می‌باشند. به این منظور روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. سکستون و همکاران (۱۹۸۶) از ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک برای به‌دست آوردن رابطه‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک و منحنی مشخصه آب خاک استفاده کردند. این پژوهشگران معادله‌های ریاضی برای برآورد هدایت هیدرولیکی و پتانسیل آب خاک در محدوده گسترده‌ای از بافت خاک ارائه کردند. پژوهشگران مختلفی مانند پاچپسکی و همکاران (۱۹۹۶) و میناسنی و همکاران (۱۹۹۹) از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی استفاده نمودند. به‌طور کلی همه این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از ۳ پارامتر می‌رسد توابع انتقالی بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی معمولاً بهتر از

توابع انتقالی رگرسیون عمل می‌کند. شاپ و همکاران (۱۹۹۸) با بررسی داده‌های ۱۲۰۹ نمونه نتیجه گرفتند که توابع انتقالی براساس شبکه عصبی معمولاً پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر توابع انتقالی رایج فراهم می‌کنند. در پژوهشی توسط وگنر و همکاران (۲۰۰۱)، ۸ تابع رگرسیونی برای برآورد هدایت هیدرولیکی خاک (اشباع و غیراشباع) از داده‌های زودیافت خاک، مورد ارزیابی قرار گرفت. آنالیزهای آماری نشان داد تابع وستن (۱۹۹۷) که نیازمند یک ورودی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده می‌باشد بهترین برآورد از هدایت هیدرولیکی غیراشباع را دارد. مانیا و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی، توانایی ۳ مدل کمپل، ون‌گنوختن و واکلین را برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع برای برای ۲ نوع خاک شنی در ۹ عمق مختلف آزمودند. پارامترهای مدل‌های نام برده به‌ترتیب با استفاده از توابع انتقالی سویل پار، رزتا و واکلین برآورد شده بود. نتایج نشان داد مدل کمپل برای خاک‌های با نسبت بالای شن، برآورد بهتری از منحنی مشخصه نسبت به مدل ون‌گنوختن دارد. مدل ون‌گنوختن محدوده مکش‌های بالاتر منحنی مشخصه را بیش برآورد می‌کرد. توابع کمپل و واکلین هدایت هیدرولیکی غیراشباع را کم‌تر برآورد کرده در حالی که نتایج مدل ون‌گنوختن نزدیک به اندازه‌گیری‌ها بوده است.

در ایران نیز اخیراً فولادمند و هادی‌پور (۲۰۱۲) ۱۲ تابع انتقالی پارامتریک را برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک روی ۳۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد توابع انتقالی پارامتریک مدل ون‌گنوختن مناسب‌تر از توابع انتقالی پارامتریک مدل‌های کمپل و بروکز و کوری می‌باشد. رضانی و همکاران (۲۰۱۱) از روش رگرسیونی خطی چندمتغیره به‌منظور توسعه توابع انتقالی نقطه‌ای برای خاک‌های شور و شور-سیدی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد توابع انتقالی توسعه‌یافته، رطوبت را در مکش‌های ۱۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به‌طور قابل توجهی بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند. همچنین نتایج این پژوهشگران نشان داد مدل رزتا رطوبت را در مکش ۳۳ کیلوپاسکال بهتر از توابع انتقالی توسعه‌یافته پیش‌بینی می‌کند.

در بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده، شاخه دفع آب منحنی مشخصه آب خاک با روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و با منحنی مشخصه برآورد شده با توابع انتقالی مورد مقایسه قرار گرفته است. در حالی که در مدل‌سازی حرکت آب در خاک در شرایط آبیاری و یا بارندگی، به‌علت این که رطوبت خاک کم می‌باشد شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک دخیل است. بنابراین در این پژوهش، دقت توابع انتقالی مختلف در برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی (۱۹۸۷)، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه و روش نمونه‌برداری: منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی در شهرستان نقده قرار گرفته است. با استفاده از نقشه‌ها و گزارش‌های خاکشناسی استان از منطقه مورد مطالعه که شامل برخی اراضی کشاورزی دشت سولدوز واقع در شهرستان نقده می‌شد تعداد ۱۰ نمونه خاک به صورت دست‌خورده و دست‌نخورده و به صورت تصادفی، از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر تهیه گردید. جرم مخصوص ظاهری ( $\rho_b$ ) با روش خشک کردن نمونه خاک دست‌نخورده در آون اندازه‌گیری شد (ژاکوب و کلارک، ۲۰۰۲). توزیع اندازه ذرات (شامل درصد‌های شن، سیلت و رس)، محتوای کربن آلی و جرم مخصوص حقیقی ( $\rho_p$ ) بر روی نمونه‌های دست‌خورده به ترتیب با روش‌های هیدرومتری (ژاکوب و کلارک، ۲۰۰۲) به روش قرائت چهار زمانه، والکلی بلک (نلسون و سامرز، ۱۹۸۲) و پیکنومتر (ژاکوب و کلارک، ۲۰۰۲) به دست آمدند. هر پارامتر در ۳ تکرار در آزمایشگاه اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در توابع انتقالی مورد استفاده قرار گرفت. تخلخل کل با استفاده از رابطه  $n = 1 - \rho_b / \rho_p$  محاسبه شد.

اندازه‌گیری شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به روش شانی: روش شانی یک روش سریع، قابل اعتماد و عملی در سطح مزرعه برای برآورد توابع  $\theta-h$  و  $K-\theta$  می‌باشد. در این روش آب با سرعت ثابتی به صورت قطره‌قطره روی سطح خاک کاملاً خشک برخورد می‌کند و در نتیجه یک ناحیه اشباع در سطح خاک به وجود می‌آید. شعاع این ناحیه اشباع با زمان افزایش می‌یابد اما بعد از مدت زمان کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد. ناحیه دیگری نیز از مرز ناحیه اشباع تا مرز خیس‌شدگی به وجود می‌آید. منحنی مشخصه آب خاک ( $\theta-h$ ) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $K-\theta$ ) را می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری‌های شعاع ناحیه اشباع و غیراشباع، به عنوان تابعی از مقدار دبی قطره‌چکان در زمان‌های مختلف و در چندین دبی متفاوت با استفاده از رابطه‌ها و معادله‌های ارایه شده توسط شانی (۱۹۸۷) به دست آورد. به علت فراوانی معادله‌ها در این روش، از ذکر آن‌ها در این مقاله خودداری می‌گردد.

اندازه‌گیری‌ها در ۱۰ مکان انجام شد. اجزای دستگاه که به صورت ساده‌ای برای این منظور ساخته شده بود، شامل یک مخزن و شیر آب می‌باشد. سطح آب در مخزن ثابت نگه داشته می‌شد و آب از یک شیر به صورت قطره‌ای خارج می‌گردید. دستگاه در وسط یک پلات مسطح با مساحت حدود ۰/۸×۰/۸ متر و با خاک کاملاً خشک، قرار داده می‌شد. به منظور مشخص نمودن رطوبت اولیه خاک،

نمونه دست‌نخورده قبل از انجام آزمایش برداشته و برای جلوگیری از هدررفت رطوبت، نمونه کاملاً پوشانیده و به آزمایشگاه انتقال داده می‌شد. ابتدا دبی تنظیم و سپس قطر ناحیه اشباع نسبت به زمان تا رسیدن به یک مقدار ثابتی اندازه‌گیری می‌گردید. هم‌زمان با اندازه‌گیری شعاع ناحیه اشباع، اندازه‌گیری ناحیه غیراشباع یعنی فاصله جبهه خیس‌شدگی از مرز ناحیه اشباع نیز انجام می‌شد. در پایان کار، برای اندازه‌گیری رطوبت اشباع حجمی، از ناحیه اشباع نمونه‌برداری می‌گردید. با استفاده از شعاع ناحیه اشباع و غیراشباع، و دبی با به‌کارگیری معادله‌های ارایه شده توسط شانی، منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع محاسبه می‌گردد.

### توابع انتقالی

نرم‌افزار رزتا<sup>۱</sup> و سویل‌پار<sup>۲</sup>: تخمین‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار رزتا بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی بوده و به‌منظور برآورد پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک و ن‌گن‌وختن و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و ن‌گن‌وختن - معلم ارایه شده است (شاپ و همکاران، ۲۰۰۱). در این پژوهش از نرم‌افزار رزتا به‌منظور برآورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک و ن‌گن‌وختن و پارامترهای منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع و ن‌گن‌وختن - معلم استفاده شد. ورودی‌های استفاده شده برای رزتا در این پژوهش درصد شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری بوده است.

نرم‌افزار سویل‌پار توسط آکوئیس و دوناتلی (۲۰۰۳) برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک طراحی گردیده است. این نرم‌افزار از توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)، وریکن و همکاران (۱۹۸۹)، مایر و جارویس (۱۹۹۹) و کمپل (۱۹۸۵) به‌ترتیب برای برآورد پارامترهای مدل‌های منحنی مشخصه بروکز و کوری (۱۹۶۴)، و ن‌گن‌وختن (۱۹۸۰)، هاتسون و کاس (۱۹۸۷) و کمپل (۱۹۷۴) استفاده می‌کند. توابع انتقالی به‌کار رفته در نرم‌افزار سویل‌پار، برای تخمین پارامترهای مدل‌های کمپل و بروکز و کوری از توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری و برای تخمین پارامترهای مدل و ن‌گن‌وختن و هاتسون و کاس علاوه‌بر توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری از محتوای کربن آلی نیز به‌عنوان ورودی استفاده می‌کنند. شایان ذکر است مدل هاتسون‌کاس شکل اصلاح‌شده مدل کمپل می‌باشد که در این مطالعه بعد از این هاتسون‌کاس ذکر خواهد شد. بنابراین در این مطالعه با

1- ROSETTA

2- SOILPAR

نرم‌افزار سویل‌پار ۴ نوع منحنی مشخصه آب خاک (کمپل، هاتسون‌کاس، بروکز و کوری و ون‌گنوختن) و یک نوع منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع (کمپل) شبیه‌سازی می‌گردد. چون توابع انتقالی ذکر شده به‌جز کمپل، هدایت هیدرولیکی اشباع را محاسبه نمی‌کنند و در مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع، یکی از پارامترهای مورد نیاز هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد، بنابراین با این نرم‌افزار فقط پارامترهای مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع کمپل برآورد گردید.

تابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) و سکستون و همکاران (۱۹۸۶): از توابع انتقالی راولز و براکنسیک به‌منظور برآورد پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، بروکز و کوری (۱۹۶۴) و کمپل (۱۹۷۴) استفاده شد. در این توابع درصد رس، درصد شن و تخلخل کل به‌عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌منظور برآورد منحنی مشخصه گاردنر و همکاران (۱۹۷۰a) و گاردنر و همکاران (۱۹۷۰b) از توابع انتقالی سکستون و همکاران (۱۹۸۶) استفاده شد. سکستون و همکاران توابع انتقالی برای برآورد پتانسیل ماتریک در محدوده وسیعی از بافت خاک ارایه نمودند که در دامنه وسیعی از رطوبت خاک قابل استفاده می‌باشند. توابع ارایه شده توسط سکستون و همکاران، از درصدهای رس و شن برای شبیه‌سازی منحنی مشخصه استفاده می‌کند.

معیارهای آماری: برای انتخاب بهترین تابع انتقالی، از ۳ معیار آماری استفاده شد. معیار MAE، میانگین خطای مطلق است که مقدار آن از صفر تا مثبت بی‌نهایت می‌باشد. مقدار صفر نشانگر تطبیق کامل مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده است. E' ضریب کارآیی اصلاح شده بوده و محدوده آن از ۱ تا منفی بی‌نهایت است. E' برابر با ۱ نشان‌دهنده برابری مقادیر تخمین زده شده با اندازه‌گیری بوده و هرچه مقدر آن از ۱ کم‌تر شود دقت مقادیر تخمین زده شده کم‌تر می‌باشد (سالازر و همکاران، ۲۰۰۸).

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

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - O'|} \quad (2)$$

1- Mean Absolute Error

که در آن‌ها،  $O$ : مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S$ : مقادیر شبیه‌سازی یا برآورد شده،  $O'$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$ : تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده - برآورده شده رطوبت می‌باشد. همچنین از ملاک آماری (RMSE) جذر میانگین مربعات خطا برای تعیین دقت برآوردها استفاده خواهد شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\xi_i - \xi'_i)^2} \quad (3)$$

که در آن،  $\xi_i$ : مقدار اندازه‌گیری شده،  $\xi'_i$ : مقدار برآورد شده و  $N$ : تعداد کل نقاط مشاهده شده می‌باشد (مانیام و همکاران، ۲۰۰۷).

### بحث و نتایج

در جدول ۱ مقادیر برخی ویژگی‌های زودییافت مورد استفاده در توابع انتقالی برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع ارایه شده است.

جدول ۱- مقادیر برخی ویژگی‌های زودییافت مورد استفاده در توابع انتقالی.

منطقه	کلاس بافت	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	جرم مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد ماده آلی	تخلخل کل
حسنلو	Clay loam	۱/۳۷	۲/۵۷	۲/۰۷	۰/۴۶
تازه‌قلعه	Silty clay	۱/۲۱	۲/۵۷	۳/۰۳	۰/۵۲
یادگارلو	Silty clay loam	۱/۰۷	۲/۵۸	۱/۳۴	۰/۵۸
بارانی عجم	Clay loam	۱/۲۳	۲/۶۱	۱/۶۸	۰/۵۲
المهدی	Sandy loam	۱/۴۳	۲/۷۱	۱/۰۱	۰/۴۷
زینه‌ور	Silty clay loam	۱/۱۸	۲/۵۵	۱/۳۴	۰/۵۳
نقده	Silty clay	۱/۰۲	۲/۴۹	۲/۱۳	۰/۵۸
حیدرآباد	Silty clay loam	۱/۱۶	۲/۵۲	۱/۴۶	۰/۵۳
گل	Silty clay	۱/۱۳	۲/۵۶	۳/۳۶	۰/۵۵
دولت‌آباد	Silty clay	۱/۰۷	۲/۵۵	۴/۰۹	۰/۵۷

### منحنی مشخصه آب خاک

نرم‌افزارهای سویل‌پار و رزتا: در این پژوهش از نرم‌افزارهای سویل‌پار و رزتا به منظور شبیه‌سازی منحنی مشخصه آب خاک استفاده شد. در شکل ۱ منحنی مشخصه آب خاک شبیه‌سازی شده با نرم‌افزارهای رزتا و سویل‌پار به همراه شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک (اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی) نشان داده شده است. با نرم‌افزار رزتا با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی، مدل منحنی مشخصه آب خاک و نگوختن شبیه‌سازی شده است. سویل‌پار پارامترهای مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک و نگوختن (۱۹۸۰)، بروکز و کوری (۱۹۶۴)، کمپل (۱۹۷۴) و هاتسون و کاس (۱۹۸۷) را به ترتیب با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی ارایه شده توسط وریکن و همکاران (۱۹۸۹)، راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)، کمپل (۱۹۸۵) و مایر و جارویس (۱۹۹۹) محاسبه می‌کند. بنابراین با نرم‌افزار سویل‌پار ۴ نوع منحنی مشخصه (ون‌گوختن، بروکز و کوری، کمپل و هاتسون و کاس) شبیه‌سازی شد. شایان ذکر است در روی شکل علائم Soilpar-BC، Soilpar-Cam و Soilpar-HC به ترتیب نشان‌دهنده منحنی‌های شبیه‌سازی شده با مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک کمپل، بروکز و کوری و هاتسون و کاس با استفاده از نرم‌افزار سویل‌پار می‌باشند. شکل ۱ نشان می‌دهد منحنی مشخصه‌های آب خاک برآورد شده تطابق مناسبی با منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده (شاخه جذب آب) ندارند. با توجه به شکل ۱ به نظر می‌رسد از بین منحنی مشخصه آب خاک شبیه‌سازی شده، منحنی هاتسون و کاس به منحنی اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت توابع انتقالی مایر و جارویس عملکرد به نسبت بهتری نسبت به سایر توابع انتقالی ارایه نموده است.

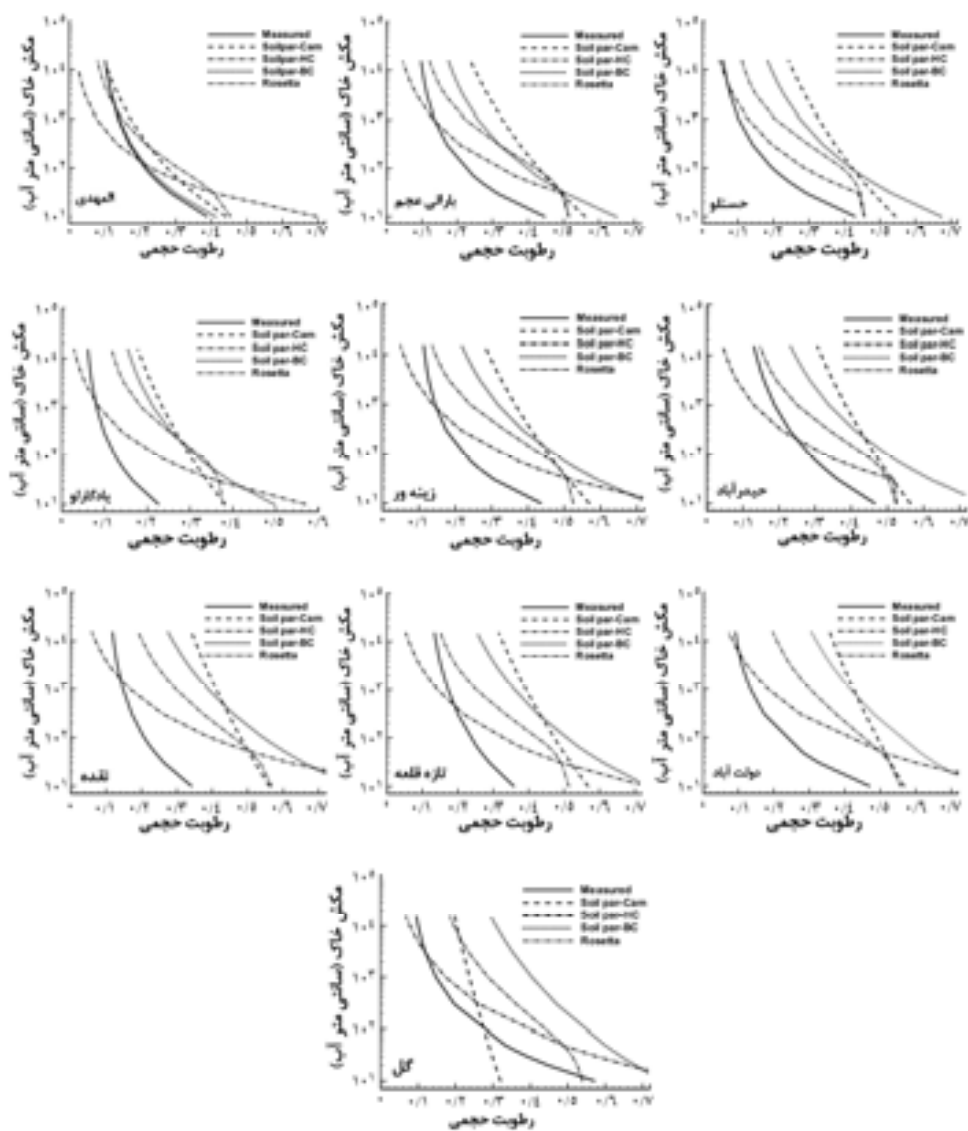
در نرم‌افزار سویل‌پار، مدل ون‌گوختن، که پارامترهای آن توسط تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۸۹) برآورد می‌گردد، برای تمامی خاک‌ها، شبیه‌سازی بسیار ضعیفی انجام داده است که علت آن برآورد خیلی کم برای پارامتر  $\alpha$  می‌باشد. بنابراین تنها مقادیر معیارهای آماری آن در جدول ۲ درج شده و از ارایه منحنی آن روی شکل ۱، به علت قرار نگرفتن تمام منحنی در محدوده شکل، خودداری شده است.



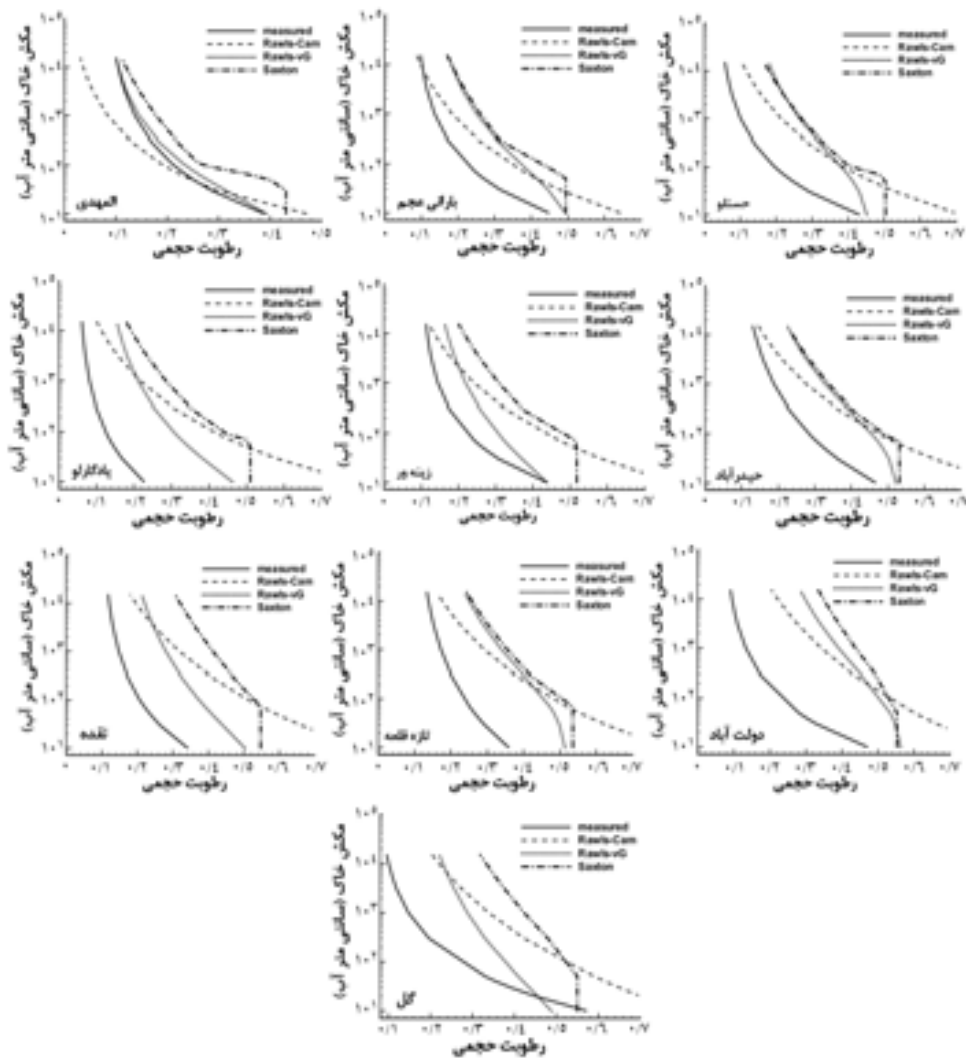
تابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) و سکستون و همکاران (۱۹۸۶): با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) دو نوع منحنی مشخصه شامل ون گنوختن (۱۹۸۰) و کمپل (۱۹۸۵) شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ منحنی مشخصه آب خاک شبیه‌سازی شده با تابع انتقالی راولز و براکنسیک به همراه شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک (اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی) نشان داده شده است. شایان ذکر است در روی شکل علایم Rawls-Cam و Rawls-vG به ترتیب نشان‌دهنده منحنی‌های شبیه‌سازی شده با معادله‌های کمپل، ون گنوختن که ضرایب آن‌ها توسط تابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) برآورد شده است. همچنین علامت Saxton نشانگر تابع انتقالی ارایه شده توسط سکستون و همکاران (۱۹۸۶) برای معادله گاردنر (۱۹۷۰a) و گاردنر (۱۹۷۰b) می‌باشد. شکل ۲ نشان می‌دهد هیچ‌یک از توابع انتقالی ارایه شده توسط راولز و براکنسیک و سکستون و همکاران نتوانسته شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک را شبیه‌سازی نماید.

جدول ۲- نتایج تجزیه آماری منحنی مشخصه آب خاک شبیه‌سازی شده با نرم‌افزارهای سویل‌پار، رزتا، راولز و براکنسیک و سکستون و همکاران برای خاک‌های منطقه مورد مطالعه.

E'	MAE (سانتی مترمکعب	RMSE (سانتی مترمکعب	تابع انتقالی - مدل
	بر سانتی مترمکعب)	بر سانتی مترمکعب)	
(انحراف معیار) میانگین	(انحراف معیار) میانگین	(انحراف معیار) میانگین	
-۲/۴۹۷۸ (۲/۰۴۱۰)	۰/۲۸۲۹ (۰/۰۹۱۳)	۰/۳۰۰۱ (۰/۰۹۰۲)	سویل‌پار- ون گنوختن
-۱/۳۶۹۹ (۱/۰۵۶۸۸)	۰/۱۸۶۷ (۰/۰۷۶۸)	۰/۱۹۹۵ (۰/۰۸۲۳)	سویل‌پار- بروکز و کوری
-۱/۲۱۸۸ (۱/۳۷۴۰)	۰/۱۷۴۰ (۰/۰۶۴۳)	۰/۱۷۸۵ (۰/۰۶۲۰)	سویل‌پار- کمپل
-۰/۳۵۷۰ (۰/۰۹۰۰۵)	۰/۱۰۲۱ (۰/۰۳۴۶)	۰/۱۳۶۵ (۰/۰۵۱۳)	سویل‌پار- هاتسون و کاس
-۰/۲۳۵۷ (۰/۰۸۴۱۵)	۰/۰۵۷۴ (۰/۰۱۱۶۵)	۰/۱۲۰۳ (۰/۰۵۷۶)	راولز- ون گنوختن
-۱/۰۳۵۳ (۱/۱۱۹)	۰/۱۵۴۱ (۰/۰۶۴۷)	۰/۱۷۵۹ (۰/۰۶۹۲)	راولز- کمپل
-۱/۰۵۳۶ (۱/۶۰۳۷)	۰/۱۸۳۲ (۰/۰۶۲۳)	۰/۱۸۳۶ (۰/۰۷۴۸)	سکستون
-۰/۳۸۹۷ (۰/۰۷۷۴۹)	۰/۱۱۰۹ (۰/۰۷۱۹۹)	۰/۱۴۳۴ (۰/۰۴۸۳)	رزتا



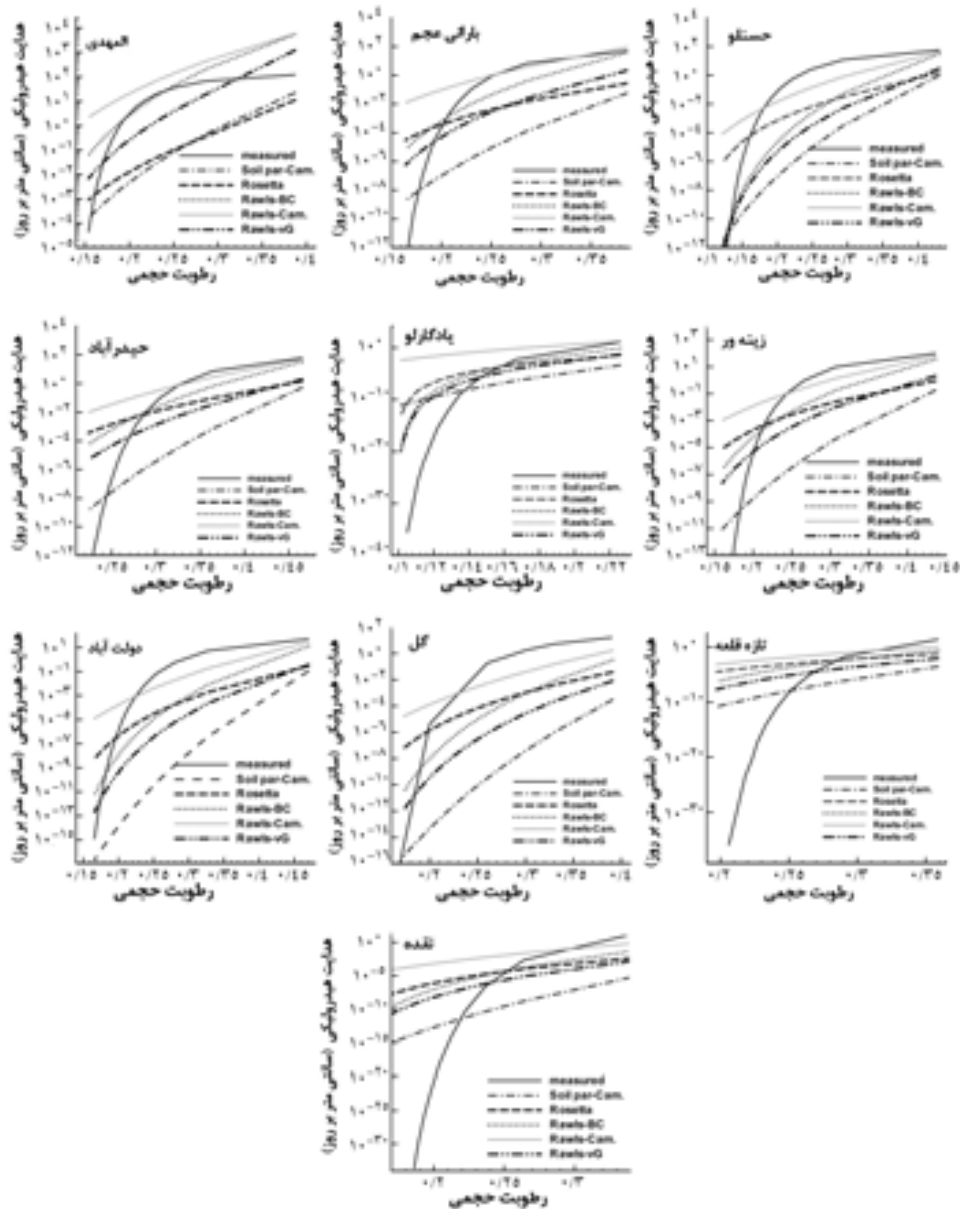
شکل ۱- منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار سویل‌پار و رزتا برای خاک‌های منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲- منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی و شبیه‌سازی شده توسط تابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) و سکستون و همکاران (۱۹۸۶) برای خاک‌های منطقه مورد مطالعه.

به‌منظور مقایسه و ارزیابی دقت توابع در برآورد منحنی مشخصه آب خاک، معیارهای آماری  $RMSE$ ،  $MAE$  و  $E'$  برای تمامی خاک‌های مناطق مورد مطالعه محاسبه و سپس میانگین و انحراف معیار آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج معیارهای آماری مختلف (جدول ۲) نشان می‌دهد هیچ کدام از توابع انتقالی نتوانسته است شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی نماید. جدول ۲ نشان می‌دهد از بین تمام مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک، منحنی مشخصه ون‌گنوختن که پارامترهای آن با توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) با  $MAE$ ،  $RMSE$  و  $E'$  به ترتیب  $۰/۱۲۰۳$ ،  $۰/۰۵۷۴$  و  $-۰/۲۳۵۷$  نسبت به بقیه منحنی مشخصه‌های شبیه‌سازی شده خطای کم‌تری دارد. شایان ذکر است در مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با برآورد شده توسط معیارهای آماری، رطوبت مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به این که مقادیر رطوبت کوچک می‌باشد بنابراین مقادیر معیارهای آماری به‌دست آمده با توجه به کمیت مورد مقایسه، رقم بزرگی می‌باشد. شکل‌های ۱ و ۲ و جدول ۲ نشان می‌دهند، توابع انتقالی سویل‌پار، رزتا، راولز و براکنسیک و سکستون و همکاران قادر به شبیه‌سازی شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک، برای خاک‌های مناطق مورد مطالعه نمی‌باشند. مقادیر اندک انحراف معیار  $MAE$ ،  $RMSE$  و  $E'$  نسبت به مقدار میانگین آن‌ها در بیش‌تر مدل‌ها، بیانگر نبود تطابق منحنی شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده، برای تمام خاک‌ها می‌باشد. به‌علت این که توابع انتقالی براساس شاخه دفع آب منحنی مشخصه آب خاک ایجاد شده‌اند بنابراین به‌نظر می‌رسد این توابع شاخه جذب منحنی مشخصه را نمی‌توانند شبیه‌سازی نمایند.

**هدایت هیدرولیکی غیراشباع:** در شکل ۳ منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده به روش صحرایی شانی و برآورد شده توسط نرم‌افزارهای رزتا و سویل‌پار و همچنین توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) ارائه شده است. در روی شکل علایم  $Rawls-BC$ ،  $Rawls-Cam$ ،  $Rawls-vG$ ، به‌ترتیب نشان‌دهنده معادله‌های منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بروکز و کوری (۱۹۶۴)، کمپل (۱۹۷۴) و ون‌گنوختن (۱۹۸۰) بوده که پارامترهای آن‌ها با استفاده از توابع انتقالی رگرسیون راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) برآورد شده است. علایم  $Rosetta$  و  $SoilPar-Cam$  نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده توابع انتقالی برآوردکننده منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و کمپل (۱۹۷۴) با استفاده از نرم‌افزارهای رزتا و سویل‌پار می‌باشد.



شکل ۳- منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده به روش صحرائی شانی و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار سویل‌پار، رزتا و توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) برای خاک‌های منطقه مورد (مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع- محور عمودی- در مقیاس لگاریتمی می‌باشد).

شکل ۳ نشان می‌دهد تطابق منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده در رطوبت‌های زیاد بهتر از رطوبت‌های کم‌تر می‌باشد. به طوری که در بیش‌تر خاک‌ها تطابق منحنی‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در حدود رطوبت‌های ۲۵ درصد تا رطوبت اشباع بیش‌تر می‌باشد. با توجه به این‌که حرکت آب و املاح در رطوبت‌های بالا اتفاق می‌افتد بنابراین اهمیت این قسمت از منحنی در مدل‌سازی آب و املاح در خاک بیش‌تر می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر معیار آماری RMSE برای ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در شبیه‌سازی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ارائه شده است. مقایسه مقادیر RMSE نشان می‌دهد توابع انتقالی عملکرد به نسبت خوبی در شبیه‌سازی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع نشان داده‌اند. کم‌ترین مقدار RMSE برای منحنی هدایت هیدرولیکی پروکز و کوری و کمپل شبیه‌سازی شده با توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) به دست آمد. عملکرد رزتا، راولز و براکنسیک و سویل‌پار در شبیه‌سازی منحنی هدایت هیدرولیکی برای منحنی‌های به ترتیب ون‌گنوختن، ون‌گنوختن و کمپل تقریباً مشابه می‌باشد. به جز برای خاک منطقه المهدی شبیه‌سازی ضعیفی توسط توابع انتقالی برای این منطقه ارائه شده است، عملکرد شبیه‌سازی با توابع انتقالی برای سایر مناطق به نسبت مناسب می‌باشد به طوری که بهترین شبیه‌سازی برای خاک منطقه یادگارلو با مقدار RMSE برابر ۱/۱۴۲۵ سانتی‌متر بر روز برای مدل کمپل که پارامترهای آن با توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) به دست آمد. بیش‌ترین مقدار RMSE (۱۲۲۴/۶۸۳ سانتی‌متر بر روز) برای خاک منطقه المهدی با بافت لومی شنی (با بافت سبک شامل ۶۵/۶۲ درصد شن) برای تمامی توابع انتقالی به دست آمد. بعد از آن بالاترین RMSE (بین ۱۳۰۴/۸۵۱۵-۲۹/۱۰۴۳ سانتی‌متر بر روز برای توابع انتقالی مختلف) برای خاک منطقه المهدی به دست آمد (جدول ۳). برای خاک سبک المهدی رزتا RMSE برابر با ۲۹/۱۰۴۳ سانتی‌متر بر روز نسبت به بقیه توابع انتقالی، بهترین شبیه‌سازی را انجام داده است. نتایج این پژوهش برای خاک سبک، هم‌سو با نتایج مانیام و همکاران (۲۰۰۷) می‌باشد. مانیام و همکاران (۲۰۰۷) توانایی ۳ مدل کمپل، ون‌گنوختن و واکلین را برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع برای دو نوع خاک‌های شنی در ۹ عمق مختلف آزمودند. پارامترهای مدل‌های نام برده به ترتیب با استفاده از توابع انتقالی سویل‌پار، رزتا و واکلین برآورد شده بود. نتایج این پژوهشگران نشان داد برای خاک شنی مدل ون‌گنوختن که پارامترهای آن توسط نرم‌افزار سویل‌پار برآورد شده است نتیجه بهتری ارائه می‌کند.

به طور کلی مقایسه عملکرد توابع انتقالی در شبیه سازی شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع برای خاک های مناطق مورد مطالعه نشان داد این توابع قادر به شبیه سازی شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک نمی باشند ولی شبیه سازی به نسبت خوبی برای منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقادیر بالای رطوبتی ارائه می دهند. همچنین به علت این که توابع انتقالی بر اساس شاخه دفع آب منحنی مشخصه آب خاک ایجاد شده اند بنابراین به نظر می رسد این توابع شاخه جذب منحنی مشخصه را نمی توانند شبیه سازی نمایند. با توجه به اهمیت شاخه جذب منحنی مشخصه برای شبیه سازی حرکت آب و املاح در خاک، بهتر است توابع انتقالی برای شبیه سازی این شاخه از منحنی مشخصه آب خاک ایجاد گردد.

جدول ۳- مقادیر معیارهای آماری RMSE (سانتی متر بر روز) برای مقایسه عملکرد توابع انتقالی در شبیه سازی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع (مدل  $K(h)$ ).

مناطق مورد مطالعه	رزتا	سویل پار-کمپل	راولز- بروکز و کوری	راولز-کمپل	راولز-ون گونختن
المهدی	۲۹/۱۰۴۳	۲۹/۱۱۲۴	۱۲۲۴/۴۶۸۳	۱۳۰۴/۸۵۱۵	۲۴۸/۱۵۸۹
بارانی عجم	۱۲/۷۰۸۵	۱۲/۷۶۴۸	۳/۴۵۷۱	۱۰/۶۳۹۴	۱۲/۲۲۱۰
حسنلو	۱۳/۵۲۸۱	۱۵/۶۰۶۸	۶/۸۲۲۸	۴/۲۲۲۱	۱۳/۱۸۲۹
حیدرآباد	۱۵/۳۶۷۹	۴/۳۷۷۴	۷/۵۹۰۶	۳/۱۴۲۲	۱۵/۲۳۸۷
یادگارلو	۳/۰۳۷۳	۳/۰۴۵۸	۲/۸۳۶۹	۱/۱۴۲۵	۳/۰۳۳۰
زینه ور	۲۱/۹۵۸۰	۲۲/۱۲۶۴	۱۳/۹۷۲۴	۱۸/۱۹۲۲	۲۲/۰۸۶۰
گل	۲۸/۹۷۸۵	۲۶/۸۳۱۳	۲۳/۱۸۵۹	۲۱/۱۲۱۹	۲۴/۷۹۲۷
دولت آباد	۱۲/۶۳۶۵	۱۲/۶۳۱۸	۹/۵۳۹۶	۵/۴۹۷۲	۱۲/۶۱۶۵
تازه قلعه	۶/۲۹۰۰	۳/۳۰۴۶	۶/۲۴۱۶	۵/۹۸۸۷	۶/۳۰۲۵
نقده	۴/۳۷۶۲	۷/۱۴۸۳	۴/۳۶۴۴	۴/۱۹۸۹	۴/۳۷۷۰

### منابع

1. Acutis, M., and Donatelli, D. 2003. *SOILPAR 2.00*: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Europ. J. Agron.* 18: 373-377.
2. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ. Hydrology Paper, 3: 27.
3. Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117: 311-314.

4. Campbell, G.S. 1985. Soil physics with Basic, Transport Models for Soil-plant System. Elsevier, New York, 150p.
5. Fooladmand, H.R., and Hadipour, S. 2012. Evaluation of parametric pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Fars province, J. Sci. Tech. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Sci. 15: 58. 25-37.
6. Gardner, W.R., Hillel, D., and Benyamini, Y. 1970a. Post irrigation movement of soil water: I. Redistribution. Water Resour. Res. 6: 851-861.
7. Gardner, W.R., Hillel, D., and Benyamini, Y. 1970b. Post irrigation movement of soil water: II. Simultaneous redistribution and evaporation. Water Resour. Res. 6: 1148-1153.
8. Hutson, J.L., and Cass, A. 1987. A retentively function for use in soil-water simulation models. J. Soil Sci. 38: 105-113.
9. Jacob, H., and Clarke, G. 2002. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Method, Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1692p.
10. Manyam, C., Morgan, C.L., Heilman, J.L., Fatondji, D., Gerard, B., and Payne, W.A. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. Geoderma. 141: 407-415.
11. Mayr, T., and Jarvis, N.J. 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model. Geoderma, 91: 1-9.
12. Minasny, B., Mc Bratney, A.B., and Bristaw, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. Geoderma, 93: 225-253.
13. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter, In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 2, Second ed, Agron, Monogr, 9, Soil Science Society of America, Madison, WI, Pp: 539-579.
14. Pachepsky, Ya.A., Timline, D., and Varallyay, G. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. J. Soil Sci. 60: 727-733.
15. Ramezani, M., Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A.M., and Salehi Khoshkroudi, Sh. 2011. Developing pedotransfer functions for saline and saline-alkali soils. J. Water Irrig. Manage. 1: 1. 99-110.
16. Rawls, W.J., and Brakensiek, D.L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. P 293-299, In: E. Jones and T.J. Ward (eds.) Watershed Management in the Eighties, Proceedings of a symposium ASCE. 30 April-2 May.
17. Rawls, W.J., and Brakensiek, D.L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. P 275-300, In: Morel-Seytoux, H.J. (ed), Unsaturated flow in hydraulic modeling. Theory and Practice, Kluwer Academic Publishers.
18. Salazar, O., Wesstrom, I., and Joel, A. 2008. Evaluation of Drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. Agric. Water Manage. 95: 1135-1143.



19. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. 1986. Estimation generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1301-1036.
20. Schaap, M.G., Leij, F.J., and van Genuchten, M.Th. 1998. Neural networks analysis for hierarchical Prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847-855.
21. Schaap, M.G., Leij, F.J., and van Genuchten, M.Th. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251: 163-176.
22. Shani, U., Hanks, R.J., Bresler, E., and Oliveira, C.A.S. 1987. Field Method for Estimating Hydraulic Conductivity and Matric potential water content Relations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 298-302.
23. van Genuchten, Mh.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
24. 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.* 148: 389-403.
25. Wagner, B., Tarnawski, V.R., Hennings, V., muller, U., Wessolek, G., and Plagge, R. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102: 257-297.
26. Wösten, J.H.M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. P 221-245, In: Gregorich E.G. and Carter M.R. (eds). *Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam.



## **Evaluation of pedotransfer functions to simulate wetting branch of soil water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity curve**

**\*A. Rasoulzadeh<sup>1</sup>, S. Razavi Ghalehjoug<sup>2</sup> and M.R. Neyshabouri<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, <sup>2</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, <sup>3</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Tabriz University, Iran

Received: 06/06/2012 ; Accepted: 09/26/2012

### **Abstract**

Water flow and solute transport modeling in the vadose zone requires understanding of soil hydraulic properties such as soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity. Direct measurements of these hydraulic properties using field and laboratory technique which are called the direct methods are costly and time consuming. Indirect determination of these properties using pedotransfer functions as suitable replacement for direct measurements has been of interest to researchers. Pedotransfer functions were commonly used to estimate drying branch of soil water retention curve in different study. Evaluation of pedotransfer functions to estimate the wetting branch of soil water retention curve has rarely been considered. In this study, accuracy of Rosetta and SoilPar software as well as pedotransfer functions of Rawls and Brakensiek and Saxton to estimate wetting branch of soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity were studied and evaluated. Shani method known as dripper method was used to measure wetting branch of soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity. Statistical criteria including RMSE, MAE and E' were used to compare the accuracy of the pedotransfer functions to estimate the wetting branch of soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity. Results showed that simulated soil water retention curve using pedotransfer functions were not consistent with the measured soil water retention curve. Comparison statistical criteria values showed that pedotransfer functions of Rawls and Brakensiek which was used to estimate parameters of Campbell's and Brooks and Corey's unsaturated hydraulic conductivity models had approximately good yield than the others pedotransfer functions.

**Keywords:** Pedotransfer functions, Wetting branch of soil water retention curve, Unsaturated hydraulic conductivity

---

\* Corresponding Author; Email: [rasoulzadeh@uma.ac.ir](mailto:rasoulzadeh@uma.ac.ir)