



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

صفحه‌های ۴۵-۵۷

# اشتقاق توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک

مجید همایون گورابجیری<sup>۱</sup>، علی رسولزاده<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی سابق علوم خاک، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده فناوری کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۵/۱۶

### چکیده

منحنی مشخصه آب خاک، یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در مطالعه حرکت آب و املاح در خاک است. اندازه‌گیری مستقیم منحنی مشخصه آب خاک زمان‌بر و پرهزینه است و توابع انتقالی را می‌توان به‌عنوان یک روش برآورد غیرمستقیم منحنی مشخصه آب خاک از ویژگی‌های زودیافت خاک به‌کار گرفت. دکستر و همکاران به‌تازگی معادله‌نمایی دوگانه جدیدی را برای منحنی مشخصه آب خاک معرفی کرده‌اند که پارامترهای آن ماهیت فیزیکی مشخصی دارند. در این پژوهش، توابع انتقالی برای برآورد پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک (درصد نسبی ذرات شن، سیلت و رس و مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک) بسط داده شد. توابع انتقالی به‌وسیله دو نرم‌افزار SPSS و DATAFIT با به‌کارگیری اطلاعات ۲۷ نمونه خاک به‌دست آمد و همچنین اطلاعات نه نمونه خاک برای سنجش اعتبار توابع انتقالی ایجادشده به‌کار گرفته شد. مقایسه توابع انتقالی به‌دست‌آمده با استفاده از سه شاخص آماری میانگین خطای مطلق ( $MAE$ )، ضریب کارایی اصلاح‌شده ( $d'$ ) و شاخص مطابقت اصلاح‌شده ( $E'$ ) نشان داد که این توابع انتقالی از دقت پذیرفتنی برخوردارند. در مجموع نرم‌افزار DATAFIT با میانگین مقادیر شاخص‌های آماری  $d'$ ،  $MAE$  و  $E'$  به ترتیب برابر با ۰/۰۲۰، ۰/۸۷۸ و ۰/۷۴۴ نسبت به نرم‌افزار SPSS با میانگین مقادیر  $d'$ ،  $MAE$  و  $E'$  به ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۸۵۲ و ۰/۶۸۴ از دقت بیشتری برخوردار است، ولی تفاوت معناداری بین مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به آنها مشاهده نشد.

کلیدواژه‌ها: توابع انتقالی، معادله دکستر، معادله‌نمایی دوگانه، منحنی مشخصه آب خاک، ویژگی‌های زودیافت خاک.

## مقدمه

منحنی مشخصه آب خاک یکی از خصوصیات هیدرولیکی، از ویژگی‌های بنیادین خاک است و بیان کمی آن برای بررسی حرکت آب در خاک و قوانین حاکم بر آن ضرورت دارد [۶] و ویژگی مهمی در حوزه هیدرولیک خاک به‌شمار می‌آید [۱]. با وجود پیشرفت در اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها، این روش‌ها چه به‌صورت آزمایشگاهی و چه صحرایی، پرهزینه و زمان‌برند. در سال‌های اخیر، روش‌های غیرمستقیم مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۹]، بنابراین ارائه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رابطه بین رطوبت و مکش آب خاک ضرورت پیدا می‌کند. از جمله مدل‌هایی که برای منحنی مشخصه آب خاک ارائه شده است، می‌توان به معادلات بروکز و کوری [۱۰]، کمپل [۱۱] و ون‌گنوختن [۲۰] اشاره کرد. در بین معادلات یادشده، معادله ون‌گنوختن بهترین کارایی را داشته و جنبه عمومی به خود گرفته است و در اکثر کدهای کامپیوتری برای مدل کردن حرکت آب و املاح در محیط‌های متخلخل به‌کار گرفته می‌شود.

یکی از روش‌های غیرمستقیم متداولی که برای تعیین پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک معرفی شده است، توابع انتقالی خاک<sup>۱</sup> است. توابع انتقالی مدل‌های تخمین یک ویژگی مشخص خاک با استفاده از ویژگی‌هایی است که اندازه‌گیری آنها آسان، سریع و ارزان است. روش معمول در برازش توابع انتقالی خاک، استفاده از رگرسیون آماری است. این روش بر پایه فرض دقیق بودن متغیرهای مورد مطالعه و مشاهدات مربوط به آن استوار است و در نهایت روابط بین متغیرها به‌طور دقیق مشخص می‌شود [۷].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، ایجاد توابع انتقالی براساس معادلات رگرسیونی برای برآورد

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک گسترش چشمگیری یافته است. بنابراین پژوهش‌های زیادی برای برآورد پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و ون‌گنوختن-معلم در بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی پارامتریک انجام گرفته است. در این پژوهش‌ها از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک به‌عنوان شاخص‌های کمی بیان‌کننده اندازه تخلخل در ایجاد توابع انتقالی استفاده شده است [۶، ۱۵، ۱۸، ۲۱]. پژوهش مشابهی نیز به‌منظور برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی معلم-ون‌گنوختن، با استفاده از توابع انتقالی در خاک‌های گچی اجرا شده است [۵].

دکستر و همکاران به‌تازگی معادله‌ای را برای منحنی مشخصه آب خاک معرفی کرده‌اند که پارامترهای آن دارای مفهوم فیزیکی است [۱۴]. این معادله به‌صورت نمایی دوگانه<sup>۲</sup> بوده و با توجه به بافت خاک و ساختمان خلل و فرج خاک به‌دست آمده و دارای پنج پارامتر است. همه پارامترهای آن، ماهیت فیزیکی دارند و با ماتریکس و ساختمان خلل و فرج خاک مرتبطند. از طرفی، اندازه خلل و فرج و ماتریکس خاک ارتباط مستقیمی با تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک دارد. این معادله نمایی دوگانه نسبت به معادله ون‌گنوختن، تطابق خوبی با داده‌های منحنی مشخصه آب خاک دارد و به‌صورت زیر است:

$$w = C + A_1 e^{(-h/h_1)} + A_2 e^{(-h/h_2)} \quad (1)$$

که در آن،  $w$ : رطوبت جرمی خاک؛  $h$ : مکش متناظر با رطوبت  $w$ ؛  $C$ : رطوبت باقی‌مانده در خاک (رطوبت خاک، وقتی که مکش به سمت بی‌نهایت میل می‌کند)؛  $A_1$ : پارامتری متناسب با فضای خلل و فرج ماتریکس

زودیافت نظیر توزیع اندازه ذرات خاک (درصد نسبی شن، سیلت و رس) و جرم مخصوص ظاهری خاک برآورد می‌کند.

### مواد و روش‌ها

به منظور ایجاد توابع انتقالی برای تعیین پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک ارائه شده توسط دکستر و همکاران [۱۴]، داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک (درصدهای شن، سیلت و رس)، جرم مخصوص ظاهری و منحنی مشخصه آب خاک ۳۶ نمونه خاک تجزیه و تحلیل شد. ۳۶ نمونه خاک استفاده شده در این پژوهش شامل ۱۳ نمونه از دشت توابع ارسنجان در استان فارس [۱۶]، شش نمونه از منطقه آراللو در استان اردبیل [۳]، ۱۰ نمونه از کمال‌آباد در استان تهران [۲]، یک نمونه از منطقه اسالم در استان گیلان [۹]، چهار نمونه از شهرستان نقده [۴] و دو نمونه از داده‌های خاک UNSODA است. جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های خاک با استفاده از سیلندره‌های نمونه‌برداری، فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتری و منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از دستگاه‌های صفحات فشاری و ستون آب آویزان و اعمال مکش‌های مختلف، اندازه‌گیری شده است. از بین ۳۶ نمونه خاک، داده‌های ۲۷ نمونه برای تعیین توابع انتقالی و ۹ نمونه دیگر برای بررسی اعتبار معادلات به دست آمده به‌طور تصادفی انتخاب و استفاده شد. پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک دکستر و همکاران [۱۴]  $(C, A_1, h_1, A_2, h_2)$  به روش معکوس<sup>۱</sup> (الگوریتم لونیبرگ-مارکوآرت<sup>۲</sup>) و با استفاده از کد *WATRECT* [۱۷] نوشته شده با زبان برنامه‌نویسی ++C محاسبه شد. برای

خاک؛  $h_1$ : مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ماتریکس خاک؛  $A_2$ : پارامتری متناسب با فضای خلل و فرج ساختمانی خاک؛ و  $h_2$ : مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ساختمانی خاک است. چون فضای موجود بین خلل و فرج ماتریکس خاک ( $A_1$ ) کوچک‌تر از فضای بین خلل و فرج ساختمان خاک ( $A_2$ ) است ( $A_1 < A_2$ )، می‌توان نتیجه گرفت که مکش آب در هنگام خروج از خلل و فرج ماتریکس ( $h_1$ )، بزرگ‌تر از مکش آب در هنگام خروج از خلل و فرج ساختمانی ( $h_2$ ) است ( $h_1 > h_2$ ) [۱۴]. چون مدت زمان زیادی از معرفی معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک نمی‌گذرد، برعکس معادله‌های بروکز و کوری و ون‌گنوختن پژوهش‌های زیادی در مورد آن انجام نگرفته است. رسول‌زاده در پژوهش خود نشان داد وابستگی داخلی پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک، کمتر از معادلات بروکز و کوری و ون‌گنوختن است و بهتر به مقادیر اندازه‌گیری شده برازش می‌یابد [۱۷]. در پژوهشی دیگر، دکستر و همکاران نشان دادند نقطه عطف معادله‌نمایی دوگانه، تابعی از پارامتر  $h_1$  است و وابستگی کمتری به پارامتر  $h_2$  دارد [۱۲]. همچنین برای برآورد مقدار رطوبت باقی مانده در خاک (پارامتر C در معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک)، دکستر و همکاران معادله رگرسیون خطی ساده‌ای را ارائه کرده‌اند. این معادله رگرسیونی به صورت تابعی از مقدار رس موجود در خاک است [۱۳].

با وجود ماهیت فیزیکی پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک دکستر و همکاران، تاکنون توابع انتقالی برای آن گزارش نشده است. از این رو هدف از این پژوهش برآورد پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک دکستر و همکاران با استفاده از توابع انتقالی است. این توابع پارامترهای معادله ذکر شده را با استفاده از ویژگی‌های

1. Inverse method  
2. Levenberg-Marquardt

گزینش دقیق‌ترین تابع بسیار مشکل و وقتگیر است. نرم‌افزار *DATAFIT* این مشکل را برطرف کرده و با توجه به متغیرهای ثابت ارائه‌شده، مناسب‌ترین توابع غیرخطی را برای هر کدام از پارامترها گزارش می‌کند. از این رو در نرم‌افزار *DATAFIT*، با توجه به متغیرهای مستقلی که تعریف شد، مدل‌های متعدد غیرخطی برازش شد و سرانجام دقیق‌ترین مدل با در نظر گرفتن بالاترین ضریب تبیین گزینش شد.

در مرحله اعتبارسنجی، ابتدا با استفاده از توابع انتقالی به‌دست‌آمده، مقادیر پارامترهای معادله‌ی نمایی دوگانه‌ی دکستر و همکاران ( $A_2, h_1, A_1, C$ ) برای ۹ نمونه‌ی خاک (که در ایجاد توابع انتقالی از آنها استفاده نشده بود) تخمین زده شد. سپس برای هر کدام از پارامترها، مقادیر تخمین‌زده‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد. به این منظور از درصد خطای نسبی بین مقادیر تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌شده استفاده شد (معادله ۲).

$$RE = \frac{|O - S|}{O} \times 100 \quad (2)$$

که در آن RE: درصد خطای نسبی، O: مقادیر پارامترهای معادله‌ی نمایی دوگانه که با برازش به منحنی مشخصه‌ی اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی کد *WATRECT* به‌دست‌آمده؛ و S: مقادیر پارامترهای معادله‌ی نمایی دوگانه به‌دست‌آمده از توابع انتقالی ایجادشده در این پژوهش است.

در مرحله بعد، با استفاده از توابع انتقالی به‌دست‌آمده، منحنی مشخصه‌ی آب خاک ۹ نمونه‌ی خاک با معادله‌ی نمایی دوگانه برآورد شد. سپس منحنی مشخصه‌ی برآوردشده با منحنی مشخصه‌ی اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد. برای مقایسه از سه شاخص<sup>۴</sup> آماری میانگین خطای مطلق (MAE)<sup>۵</sup>،

اشتقاق توابع انتقالی، روش آماری رگرسیون چندگانه (خطی و غیرخطی) با استفاده از نرم‌افزارهای آماری *SPSS* و *DATAFIT* به‌کار گرفته شد. در این دو نرم‌افزار از روش الگوریتم لونبرگ-مارکوارت برای رگرسیون‌گیری و اشتقاق توابع انتقالی استفاده شده است. در این تحقیق متغیرهای مستقل شامل ویژگی‌های زودیاقت خاک نظیر درصد نسبی ذرات شن، سیلت و رس و جرم مخصوص ظاهری خاک، و متغیرهای وابسته شامل پارامترهای معادله‌ی نمایی دوگانه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب خاک ( $A_2, h_1, A_1, C$ ) و  $h_2$ ) است. نخستین گام در تجزیه و تحلیل آماری، آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها است. زیرا آزمون‌های آماری، بر پایه‌ی نرمال بودن توزیع داده‌ها بنا شده است و غیرنرمال بودن داده‌ها این آزمون‌ها را نامعتبر می‌سازد [۱۴]. آزمون نرمال بودن داده‌ها به‌وسیله‌ی نرم‌افزار *SPSS* و به‌روش آزمون کولموگروف - اسمیرنوف<sup>۱</sup> انجام گرفت. در توابع انتقالی ایجادشده در این پژوهش، گاهی برای جلوگیری از بروز همراستایی چندگانه<sup>۲</sup> بین درصدهای سیلت و رس از نسبت سیلت به رس استفاده شده است. در نرم‌افزار *SPSS* ترکیب‌های متفاوت از متغیرهای ثابت برای به‌دست آوردن تابع انتقالی مورد نظر آزمون شد. این عمل از طریق همبستگی خطی چندگانه و به‌روش گام‌به‌گام<sup>۳</sup> صورت گرفت. در نهایت دقیق‌ترین تابع انتقالی خطی با توجه به ضریب تبیین و خطای استاندارد که به‌وسیله‌ی نرم‌افزار *SPSS* ارائه می‌شود، گزینش شد. در ادامه سعی شد توابع انتقالی غیرخطی نیز برای پارامترهای یادشده ارائه شود. چون برای هر کدام از پارامترها توابع غیرخطی متعددی با ترکیب‌های متفاوت (اعم از نمایی، لگاریتمی و ...) قابل محاسبه است، استفاده از نرم‌افزار *SPSS* برای اشتقاق توابع غیرخطی و

1. Kolmogorov-Smirnov
2. Multicollinearity
3. Step wise

4. Criteria

5. Mean Absolute Error

اشتقاق توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک

نرم‌افزار *SPSS* و *DATAFIT*، از آزمون *t* میانگین مشاهدات جفت‌شده<sup>۳</sup> استفاده شد.

ضریب کارایی اصلاح‌شده ( $E'$ ) و شاخص مطابقت اصلاح‌شده ( $d'$ )<sup>۲</sup> استفاده شد (معادله‌های ۳ تا ۵).

### نتایج

نتایج آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها نشان داد که کلیه متغیرهای وابسته و مستقل دارای توزیع نرمالند. میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار متغیرهای مستقل اندازه‌گیری‌شده و پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه دکستر و همکاران [۱۴] که با استفاده از کد *WATRECT* به دست آمده، برای ۲۷ نمونه خاک استفاده‌شده در تعیین توابع انتقالی، در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ مقادیر این آماره‌ها برای ۹ نمونه خاک که در تعیین اعتبار توابع انتقالی ایجادشده از آنها استفاده شد، گزارش شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (3)$$

$$E' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - O'|} \quad (4)$$

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

که  $O_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت؛  $S_i$ : مقادیر برآورده رطوبت؛  $O'$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده؛ و  $n$ : تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآورده رطوبت است [۱۹].

برای مقایسه میانگین مقادیر شاخص‌های آماری دو

جدول ۱. میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده و پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه (معادله دکستر و همکاران) در ۲۷ نمونه خاک (استفاده‌شده در اشتقاق توابع انتقالی).

| متغیر                          | تعداد | میانگین | حداقل  | حداکثر | انحراف معیار |
|--------------------------------|-------|---------|--------|--------|--------------|
| درصد شن                        | ۲۷    | ۲۶/۷    | ۵/۶    | ۴۸     | ۱۱/۷۸        |
| درصد سیلت                      | ۲۷    | ۴۳/۹    | ۱۷     | ۶۵/۶   | ۱۴/۰۴        |
| درصد رس                        | ۲۷    | ۲۹/۴    | ۲/۱    | ۶۷     | ۱۴/۹۷        |
| جرم مخصوص ظاهری ( $gcm^{-3}$ ) | ۲۷    | ۱/۴۹    | ۰/۹۵   | ۱/۹۱   | ۰/۲۷         |
| پارامتر $C$ ( $gg^{-1}$ )      | ۲۷    | ۰/۰۹۸   | ۰/۰۵   | ۰/۲۵   | ۰/۰۵         |
| پارامتر $A_1$ (-)              | ۲۷    | ۰/۱۰۱   | ۰/۰۳   | ۰/۲۸   | ۰/۰۶         |
| پارامتر $h_1$ (cm)             | ۲۷    | ۲۹۳۱/۴۱ | ۹۱۸    | ۷۵۷۰   | ۱۵۰۷/۴۴      |
| پارامتر $A_2$ (-)              | ۲۷    | ۰/۱۱۴۶  | ۰/۰۴۱۶ | ۰/۲۹۶  | ۰/۰۷         |
| پارامتر $h_2$ (cm)             | ۲۷    | ۲۰۸/۱۵  | ۴۴     | ۱۰۰۰   | ۱۷۵/۲۵       |

1. Modified Coefficient Efficiency
2. Modified Index of agreement
3. Compare Means Paired t test

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

جدول ۲. میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار ویژگی‌های زودیاخت اندازه‌گیری شده در ۹ نمونه خاک (استفاده شده در تعیین اعتبار توابع انتقالی).

| متغیر                                 | تعداد | میانگین | حداقل  | حداکثر | انحراف معیار |
|---------------------------------------|-------|---------|--------|--------|--------------|
| درصد شن                               | ۹     | ۳۷      | ۳/۵۲   | ۶۸/۳   | ۱۹/۹۸        |
| درصد سیلت                             | ۹     | ۴۰/۳۸   | ۲۰/۴   | ۶۸     | ۱۳/۹۸        |
| درصد رس                               | ۹     | ۲۲/۶۱   | ۸      | ۵۳/۸۱  | ۱۳/۵۶        |
| جرم مخصوص ظاهری ( $\text{gcm}^{-3}$ ) | ۹     | ۱/۳۲    | ۱/۱۱   | ۱/۴۶   | ۰/۱۲         |
| پارامتر C ( $\text{gg}^{-1}$ )        | ۹     | ۰/۱۰۴۳  | ۰/۰۲۷۷ | ۰/۱۷۶۱ | ۰/۰۴         |
| پارامتر $A_1$ (-)                     | ۹     | ۰/۱۱۵۱  | ۰/۰۶۷۲ | ۰/۱۵۱۶ | ۰/۰۳         |
| پارامتر $h_1$ (cm)                    | ۹     | ۴۴۲۸    | ۲۳۸۸   | ۸۲۷۳   | ۲۰۱۷/۲۸      |
| پارامتر $A_2$ (-)                     | ۹     | ۰/۱۵۵۳  | ۰/۰۸۶۷ | ۰/۲۳۰۹ | ۰/۰۵         |
| پارامتر $h_2$ (cm)                    | ۹     | ۲۰۲/۰۳  | ۵۶/۶۰  | ۳۷۴/۹۰ | ۱۱۸/۷۳       |

برآورد شده است. همچنین در هر دو نرم‌افزار *SPSS* و *DATAFIT* تخمین توابع انتقالی برای دو پارامتر  $h_1$  (پارامتر مربوط به مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ماتریکس خاک) و  $h_2$  (پارامتر مربوط به مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ساختمانی خاک) نسبت به بقیه توابع کمترین دقت را داشته‌اند.

نرم‌افزار *DATAFIT* به جز تابع انتقالی مربوط به پارامتر  $h_2$ ، بقیه توابع انتقالی (توابع انتقالی مربوط به پارامترهای  $C$ ،  $A_1$ ،  $h_1$  و  $A_2$ ) را با مقادیر ضریب تبیین بالاتری نسبت به نرم‌افزار *SPSS* تخمین زده است. نرم‌افزار *DATAFIT* نسبت به نرم‌افزار *SPSS* در تخمین پارامترهای  $C$ ،  $A_1$ ،  $h_1$  و  $A_2$  از دقت بیشتری برخوردار بود، از این رو می‌توان انتظار داشت که برآورد منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از توابع انتقالی تخمین زده شده با نرم‌افزار *DATAFIT* دقت نسبی بیشتری در مقایسه با نرم‌افزار *SPSS* داشته باشد.

با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده برای ۲۷ نمونه خاک، توابع انتقالی پارامتریک به وسیله نرم‌افزارهای *SPSS* و *DATAFIT* برآورد شده‌اند که در زیر بیان می‌شوند:

#### توابع انتقالی پارامتریک به دست آمده با استفاده از نرم‌افزارهای *SPSS* و *DATAFIT*

توابع انتقالی ایجاد شده به وسیله نرم‌افزارهای *SPSS* و *DATAFIT* برای هر کدام از پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک (معادله دکستر و همکاران) به همراه مقادیر ضریب تبیین و خطای استاندارد هر کدام از توابع انتقالی به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ گزارش شده است.

مطابق جدول‌های ۳ و ۴ و با توجه به مقادیر ضریب تبیین و خطای استاندارد به دست آمده برای هر کدام از پارامترها، در هر دو نرم‌افزار *SPSS* و *DATAFIT* تابع انتقالی به دست آمده مربوط به پارامتر  $C$  (رطوبت باقی مانده در خاک) با بیشترین دقت نسبت به بقیه توابع انتقالی

#### مدیریت آب و آبیاری

اشتقاق توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای معادله نمای دوگانه منحنی مشخصه آب خاک

جدول ۳. توابع انتقالی پارامتریک ایجاد شده با استفاده از نرم افزار SPSS

(sand, clay و silt به ترتیب درصد وزنی ذرات شن، رس و سیلت، Bd جرم مخصوص ظاهری خاک (gcm<sup>-3</sup>))

| خطای استاندارد | ضریب تبیین | تابع انتقالی   | پارامتر |
|----------------|------------|--|---------|
| ۰/۰۱۶۵         | ۰/۸۸۷      | $-0.002sand - (4.121 \times 10^{-6})(silt / clay) - 0.001silt - 0.134Bd + 0.392$ | $C$     |
| ۰/۰۴۴۵         | ۰/۵۳۲      | $-0.001(silt / clay) - 0.175Bd + 0.366$  | $A_1$   |
| ۸۹۲/۷۱۶        | ۰/۲۵۶      | $44.984silt - 43.917(silt / clay) + 937.177$                                     | $h_1$   |
| ۰/۰۴۱۸         | ۰/۶۰۴      | $-0.19Bd + 0.398$  | $A_2$   |
| ۵۸/۰۱۱         | ۰/۳۵۸      | $-0.169clay + 3.229silt + 48.283$  | $h_2$   |

جدول ۴. توابع انتقالی پارامتریک با استفاده از نرم افزار DATAFIT

(sand, clay و silt به ترتیب درصد وزنی ذرات شن، رس و سیلت، Bd جرم مخصوص ظاهری خاک (gcm<sup>-3</sup>))

| خطای استاندارد | ضریب تبیین | تابع انتقالی   | پارامتر |
|----------------|------------|--|---------|
| ۰/۰۱۴          | ۰/۹۲۴      | $\exp((-0.0093sand) - (0.0221(silt / clay))) - (1.5305Bd) + 0.1593$  | $C$     |
| ۰/۰۴۲          | ۰/۶۳۲      | $\exp((0.0102sand) - (0.0145(silt / clay))) - (1.625Bd) - 0.2338$    | $A_1$   |
| ۹۲۳/۵۰۸        | ۰/۳۴۹      | $(197.4127silt^{0.6839}) - (0.0533(silt / clay)^{3.0827}) + 237.321$ | $h_1$   |
| ۰/۰۴۱          | ۰/۶۶۴      | $\exp((-0.0013sand) + (0.0218(silt / clay))) - (1.6533Bd) + 0.1658$  | $A_2$   |
| ۶۶/۷۲۸         | ۰/۲۲۸      | $(-1.6415clay) + (73.0201 \log Bd) + 202.7846$                       | $h_2$   |

### سنجش اعتبار توابع انتقالی

مقایسه دقت تخمین پارامترهای معادله نمای دوگانه

منحنی مشخصه آب خاک

برای مقایسه مقادیر تخمین زده شده و اندازه گیری شده پارامترهای معادله نمای دوگانه برای ۹ نمونه خاک (دو نمونه از کمال آباد استان تهران، یک نمونه از منطقه اسالم استان گیلان، چهار نمونه از شهرستان نقده در استان آذربایجان غربی و دو نمونه از داده های خاک UNSODA) استفاده شده در اعتبارسنجی از درصد خطای نسبی (معادله

۲) استفاده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد در خاک های لومی (کمال آباد) و لوم رسی (نقده) (هر دو نرم افزار SPSS و DATAFIT) و لوم سیلتی (کمال آباد) (نرم افزار SPSS)، پارامتر  $A_1$  دارای بیشترین درصد خطای نسبی در مقایسه با پارامترهای دیگر است. همچنین، پارامتر  $h_1$  در خاک های لومی (UNSODA) (هر دو نرم افزار SPSS و DATAFIT) و لوم شنی (UNSODA) (نرم افزار SPSS)، بیشترین خطا را دارد (جدول ۵). در بقیه خاک ها، پارامتر  $h_2$  دارای بیشترین درصد خطای نسبی در مقایسه با پارامترهای دیگر است.

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

جدول ۵. مقادیر درصد خطای نسبی در تخمین پارامترها به وسیله دو نرم افزار SPSS و DATAFIT

| درصد خطای نسبی در تخمین پارامترها |       |       |       |        | نرم افزار استفاده شده | نوع خاک     |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|-------------|
| $h_2$                             | $A_2$ | $h_1$ | $A_1$ | C      |                       |             |
| ۲/۳۷                              | ۱۴/۱۷ | ۷/۴۲  | ۲۳/۲۳ | ۱۸/۹۵  | SPSS                  | لومی        |
| ۲۵/۹۷                             | ۲۴/۸۴ | ۶/۲۲  | ۳۵/۳۹ | ۱۳/۱۷  | DATAFIT               | (کمال آباد) |
| ۲۹/۰۹                             | ۸/۷۳  | ۳۴/۹۹ | ۷۱/۵۸ | ۵/۱۲   | SPSS                  | لوم سیلتی   |
| ۴۸/۳۲                             | ۵/۹۳  | ۳۴/۷۱ | ۳۶/۷۶ | ۹/۹۲   | DATAFIT               | (کمال آباد) |
| ۰/۷۰                              | ۴/۲۵  | ۳/۶۸  | ۱۲/۱۴ | ۱۹/۵۹  | SPSS                  | لوم رسی     |
| ۱۳/۰۳                             | ۳/۴۰  | ۳/۰۴  | ۱۲/۸۶ | ۱۰/۳۴  | DATAFIT               | (اسالم)     |
| ۴۶/۱۶                             | ۲۸/۸۴ | ۱۴/۵۰ | ۶۲/۷۹ | ۲۶/۷۲  | SPSS                  | لوم رسی     |
| ۴۴/۱۸                             | ۳۴/۴۷ | ۱۳/۷۱ | ۶۵/۰۷ | ۳۰/۴۸  | DATAFIT               | (نقده)      |
| ۴۳/۲۶                             | ۷/۲۸  | ۳۰/۹۰ | ۳۸/۸۱ | ۲۲/۷۶  | SPSS                  | رس سیلتی    |
| ۶۲/۰۶                             | ۶/۶۳  | ۳۱/۲۲ | ۷/۲۱  | ۲۷/۲۰  | DATAFIT               | (نقده)      |
| ۹۷/۵۱                             | ۷/۸۱  | ۷۸/۳۵ | ۱۹/۲۲ | ۱۱/۴۶  | SPSS                  | لوم شنی     |
| ۲۳۷/۷۷                            | ۲۳/۲۱ | ۷۸/۳۷ | ۴/۷۴  | ۲۵/۶۴  | DATAFIT               | (نقده)      |
| ۱۳۶/۵۰                            | ۵۸/۸۲ | ۲۵/۷۴ | ۱۰/۶۲ | ۰/۹۴   | SPSS                  | لوم رسی     |
| ۹۷/۲۳                             | ۴۲/۱۰ | ۲۵/۷۶ | ۲۴/۴۶ | ۳/۳۵   | DATAFIT               | (نقده)      |
| ۵۰/۳۸                             | ۱۹/۴۲ | ۶۸/۳۸ | ۱۸/۷۴ | ۴۹/۴۶  | SPSS                  | لوم شنی     |
| ۱۴۴/۵۴                            | ۳۰/۷۴ | ۶۶/۹۸ | ۷/۵۲  | ۱۳۸/۹۹ | DATAFIT               | (UNSODA)    |
| ۳۸/۱۶                             | ۲۲/۳۶ | ۴۷/۲۲ | ۴۴/۸۲ | ۳۴/۲۶  | SPSS                  | لومی        |
| ۳۶/۹۳                             | ۷/۹۳  | ۴۵/۸۹ | ۴۴/۸۲ | ۲۵/۳۷  | DATAFIT               | (UNSODA)    |

معادله نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک برای ۹ نمونه خاک محاسبه و منحنی مشخصه برآورد شده و اندازه گیری شده به وسیله نرم افزار Tecplot رسم شد (شکل ۱).

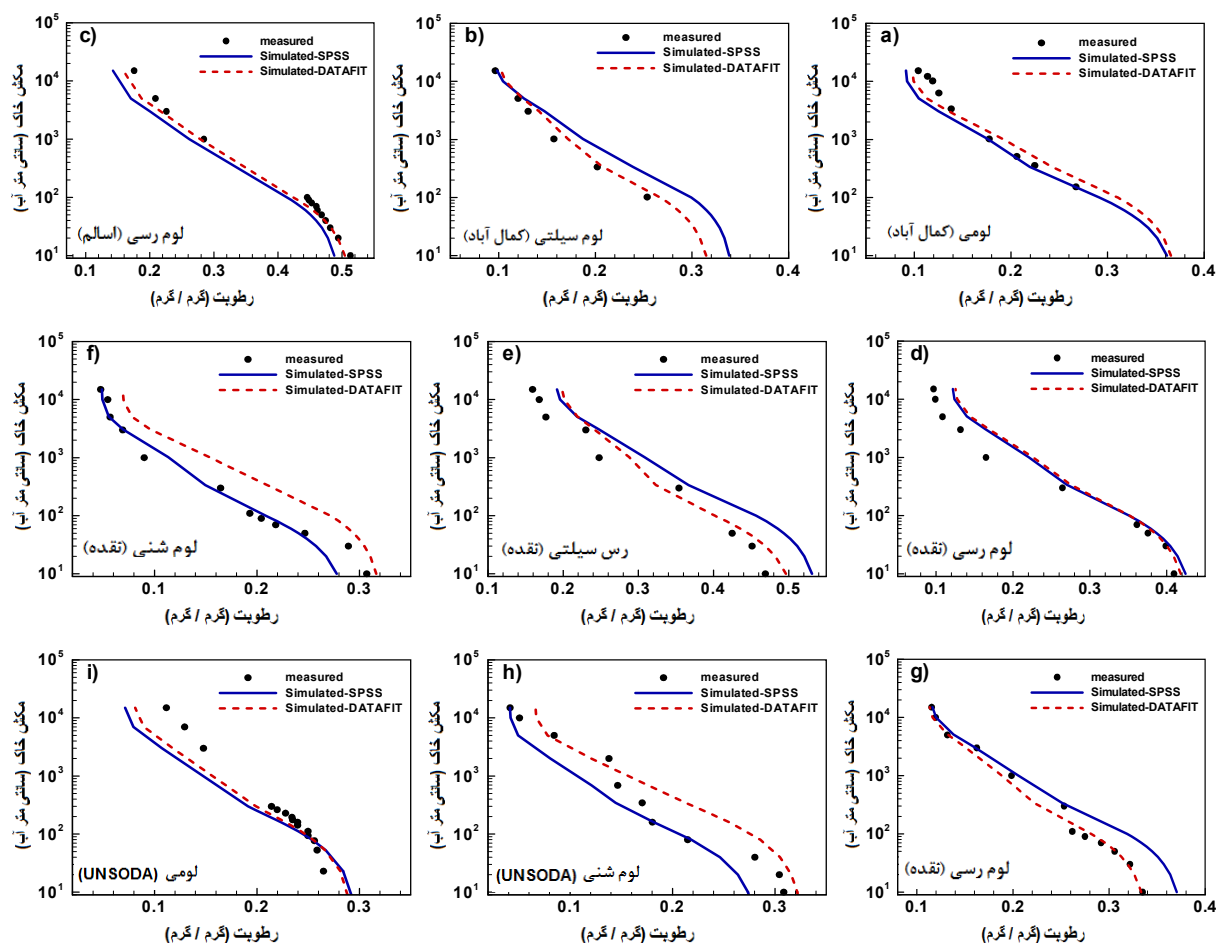
مقایسه کیفی منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده و اندازه گیری شده با به کارگیری توابع انتقالی به دست آمده، مقادیر پارامترهای

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳



## اشتقاق توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای معادله‌نمایی دوگانه منحنی مشخصه آب خاک



شکل ۱. منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با توابع انتقالی ایجاد شده برای معادله‌نمایی دوگانه

(معادله دکستر و همکاران) با دو نرم‌افزار SPSS و DATAFIT برای ۹ نمونه خاک

منحنی مشخصه در مکش‌های بالا را می‌توان به دلیل خطای تخمین زیاد پارامتر  $A_1$  دانست. در خاک لوم شنی (نقده) (شکل ۱-f) مشاهده می‌شود که منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده به وسیله توابع انتقالی ایجاد شده با نرم‌افزار DATAFIT تطابق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری ندارد. این منحنی در مکش‌های بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر آب فاصله بیشتری را با مقادیر اندازه‌گیری نشان می‌دهد. در این خاک، پارامتر  $h_2$  با خطای نسبی زیادی (۲۳۷/۷۷ درصد) برآورد شده است (جدول ۵). چون پارامتر  $h_2$  بیانگر مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ساختمانی خاک بوده و ساختمان خاک به‌طور

شکل ۱ نشان می‌دهد که تابع انتقالی ایجاد شده در این پژوهش توانسته است منحنی مشخصه آب خاک را در اکثر خاک‌ها با دقت مناسبی برآورد کند. در خاک لوم رسی (نقده) (شکل ۱-d) منحنی مشخصه برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در مکش‌های زیاد تطابق مناسبی ندارد. بیشترین درصد خطای نسبی در این خاک، مربوط به پارامتر  $A_1$  است که مقدار آن در دو نرم‌افزار SPSS و DATAFIT به ترتیب ۶۲/۷۹ و ۶۵/۰۷ درصد است (جدول ۵). پارامتر  $A_1$  مربوط به خلل و فرج ماتریکس خاک است و بر شکل منحنی مشخصه آب خاک در مکش‌های زیاد تأثیر دارد. بنابراین، در این خاک، دقت به‌نسبت کم برآورد

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

منحنی مشخصه آب خاک مربوط به پارامتر  $h_1$  (مکش آب خاک در هنگام خروج آب از فضای خلل و فرج ماتریکس خاک) است و در این خاک،  $h_1$  بیشترین درصد خطای نسبی (۴۷/۲۲ و ۴۵/۸۹ درصد به ترتیب برای SPSS و DATAFIT) را داراست، خطا در برآورد منحنی مشخصه، مربوط به خطای تخمین پارامتر  $h_1$  است.

معمول در مکش های زیر یک بار (در حدود ۱۰۰۰ سانتی-متر آب) بر منحنی مشخصه تأثیرگذار است، می توان خطای برآورد منحنی مشخصه آب خاک در این نمونه را مربوط به تخمین پارامتر  $h_2$  دانست. در خاک لومی (UNSODA) (شکل ۱-۱) برآورد منحنی مشخصه آب خاک به وسیله هر دو نرم افزار SPSS و DATAFIT در مکش های بالا از دقت به نسبت کمی برخوردار است. چون مکش های بالا در

جدول ۶. بررسی دقت توابع انتقالی در ۹ نمونه خاک و مقایسه آنها با استفاده از سه شاخص آماری

| نوع خاک              | نرم افزار استفاده شده | MAE             | $d'$            | $E'$            |
|----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| لومی                 | SPSS                  | ۰/۰۱۴۲          | ۰/۹۰۱۷          | ۰/۷۹۳۲          |
| (کمال آباد)          | DATAFIT               | ۰/۰۱۵۳          | ۰/۸۹۵۹          | ۰/۷۷۷۴          |
| لوم سیلتی            | SPSS                  | ۰/۰۲۸۸          | ۰/۷۸۲۲          | ۰/۵۰۴۲          |
| (کمال آباد)          | DATAFIT               | ۰/۰۱۳۹          | ۰/۸۸۴۲          | ۰/۷۶۱۴          |
| لوم رسی              | SPSS                  | ۰/۰۲۵۰          | ۰/۸۶۷۴          | ۰/۷۴۷۰          |
| (اسالم)              | DATAFIT               | ۰/۰۱۱۲          | ۰/۹۴۲۲          | ۰/۸۸۶۶          |
| لوم رسی              | SPSS                  | ۰/۰۲۱۸          | ۰/۹۰۹۲          | ۰/۸۲۵۴          |
| (نقده)               | DATAFIT               | ۰/۰۲۲۲          | ۰/۹۰۶۱          | ۰/۸۲۱۸          |
| رس سیلتی             | SPSS                  | ۰/۰۴۴۹          | ۰/۸۱۹۹          | ۰/۶۲۷۱          |
| (نقده)               | DATAFIT               | ۰/۰۲۸۵          | ۰/۸۷۶۵          | ۰/۷۶۳۵          |
| لوم شنی              | SPSS                  | ۰/۰۱۳۶          | ۰/۹۱۸۴          | ۰/۸۴۳۲          |
| (نقده)               | DATAFIT               | ۰/۰۳۸۰          | ۰/۷۹۵۹          | ۰/۵۶۳۰          |
| لوم رسی              | SPSS                  | ۰/۰۲۴۴          | ۰/۸۵۳۰          | ۰/۶۶۱۱          |
| (نقده)               | DATAFIT               | ۰/۰۰۷۲          | ۰/۹۵۱۴          | ۰/۸۹۹۸          |
| لوم شنی              | SPSS                  | ۰/۰۲۵۹          | ۰/۸۴۸۶          | ۰/۷۰۰۵          |
| (UNSODA)             | DATAFIT               | ۰/۰۲۷۲          | ۰/۸۵۱۳          | ۰/۶۸۵۷          |
| لومی                 | SPSS                  | ۰/۰۲۰۰          | ۰/۷۶۸۱          | ۰/۴۴۵۴          |
| (UNSODA)             | DATAFIT               | ۰/۰۱۵۴          | ۰/۸۱۲۶          | ۰/۵۷۳۱          |
| متوسط مقادیر شاخص ها | SPSS                  | (۰/۰۰۸۸) ۰/۰۲۴۶ | (۰/۰۵۰۹) ۰/۸۵۲۳ | (۰/۱۳۱۱) ۰/۶۸۴۴ |
| (انحراف معیار)       | DATAFIT               | (۰/۰۰۹۴) ۰/۰۲۰۴ | (۰/۰۵۰۳) ۰/۸۷۷۵ | (۰/۱۱۴۹) ۰/۷۴۴۴ |

در توابع انتقالی ایجادشده برای پارامتر  $A_1$  (جدول‌های ۳ و ۴) متغیر درصد ذرات رس خاک به دلیل سطح ویژه به نسبت بالای ذرات رس، اثر افزایشی بر مقدار خلل و فرج ماتریکس خاک ( $A_1$ ) دارد. همچنین متغیرهای جرم مخصوص ظاهری خاک و نسبت سیلت به رس اثر منفی بر مقدار پارامتر  $A_1$  دارند. زیاد بودن جرم مخصوص ظاهری خاک، مبین بافت درشت‌تر خاک و در نتیجه کاهش خلل و فرج ماتریکس ( $A_1$ ) در خاک است. از طرفی هر چه بافت خاک درشت‌تر و یا به عبارت دیگر خاک سبک‌تر باشد (مانند خاک‌های شنی)، به دلیل عدم تشکیل ساختمان و خاکدانه، این خاک‌ها قابلیت تراکم‌پذیری بیشتر و جرم مخصوص ظاهری بالایی خواهند داشت. بنابراین افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک اثر منفی بر قطر خلل و فرج ساختمانی خاک ( $A_2$ ) دارد (جدول‌های ۳ و ۴). هر چه خلل و فرج ساختمانی خاک کوچک‌تر و باریک‌تر شود، مکش آب داخل این خلل و فرج ( $h_2$ ) افزایش خواهد یافت. بنابراین افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک سبب افزایش مکش آب خاک در داخل خلل و فرج ساختمانی می‌شود (جدول ۴). علاوه بر آن در توابع انتقالی برآوردشده برای پارامتر  $h_2$  به وسیله هر دو نرم‌افزار *SPSS* و *DATAFIT* (جدول‌های ۳ و ۴)، ضریب متغیر درصد رس منفی است. افزایش مقدار رس موجود در خاک، سبب هم‌اوری ذرات خاک و تشکیل دانه‌های فولکول<sup>۱</sup> شده و به تدریج خاکدانه‌های کوچک و بزرگ تشکیل می‌شود. بنابراین مکش آب خاک در خلال این خاکدانه‌ها ( $h_2$ ) کاهش خواهد یافت.

مطابق توابع انتقالی به دست آمده برای پارامتر  $h_1$  (به وسیله هر دو نرم‌افزار *SPSS* و *DATAFIT* در جدول‌های ۳ و ۴)، با افزایش مقدار رس، نسبت سیلت به

مقایسه کمی منحنی مشخصه آب خاک برآوردشده و اندازه‌گیری شده

برای مقایسه کمی منحنی مشخصه‌های ارائه شده در شکل ۱ از شاخص‌های آماری مختلف (معادله‌های ۳ تا ۵) استفاده شد. شاخص‌های آماری نشان دادند که برای برخی خاک‌ها، استفاده از رگرسیون خطی به وسیله نرم‌افزار *SPSS* و در نمونه‌های دیگر خاک، استفاده از رگرسیون غیرخطی به وسیله نرم‌افزار *DATAFIT* برآورد بهتری از منحنی مشخصه آب خاک دارند. مقایسه میانگین مقادیر شاخص‌های آماری با استفاده از آزمون  $t$  مشاهدات جفت شده، نشان داد که با وجود دقت بهتر نرم‌افزار *DATAFIT* نسبت به نرم‌افزار *SPSS* در ایجاد توابع انتقالی، در مجموع تفاوت معناداری بین مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به آنها وجود ندارد (جدول ۶).

### نتیجه‌گیری کلی و بحث

با توجه به جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که در توابع انتقالی ایجادشده برای پارامتر  $C$ ، جرم مخصوص ظاهری خاک، اثر منفی بر مقدار پارامتر  $C$  دارد. با عنایت به اینکه زیاد بودن جرم مخصوص ظاهری خاک، نشان‌دهنده بافت درشت‌تر خاک است و ذرات شن ظرفیت نگهداری آب کمتری نسبت به ذرات رس دارند، می‌توان انتظار داشت که با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، رطوبت باقی مانده در خاک ( $C$ ) کاهش یابد. درصد شن موجود در خاک نیز همانند جرم مخصوص ظاهری خاک بر مقدار پارامتر  $C$  اثر منفی می‌گذارد. همچنین در توابع انتقالی مربوط به پارامتر  $C$ ، هر قدر نسبت سیلت به رس کمتر شده، یا مقدار رس خاک بیشتر شود، مقدار پارامتر  $C$  افزایش خواهد یافت که آن نیز به دلیل سطح ویژه و بیشتر بودن ظرفیت نگهداری آب ذرات رس نسبت به دیگر ذرات خاک است

[۵].

جهت تخمین منحنی رطوبتی در منطقه آراللوی اردبیل. یازدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۴. رضوی قلعه جوق س (۱۳۸۹) توابع انتقالی برای تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های زراعی - شهرستان نقده، ایران. دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

۵. فرخیان فیروزی ا. و همایی م (۱۳۸۴) ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک‌های گچی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۲۴ (۶): ۱۲۹-۱۴۲.

۶. قربانی دشتکی ش. و همایی م (۱۳۸۲) برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت.

۷. محمدی ج. و طاهری س م (۱۳۸۴) برازش توابع انتقالی خاک با استفاده از رگرسیون فازی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹ (۲): ۵۱-۶۰.

۸. نوایان م.، لیاقت ع. و همایی م (۱۳۸۳) تخمین هدایت آبی اشباع با استفاده از توابع انتقالی، سومین کارگاه فنی زهکشی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۹. همپور گورابجیری م.، رسولزاده ع. و اسمعیلی عوری ا (۱۳۸۸) بررسی تأثیر گونه گیاهی بر خصوصیات فیزیکی و منحنی مشخصه آب خاک در جنگل‌های پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط. همایش ملی اصلاح الگوی مصرف در کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

رس کاهش خواهد یافت و با توجه به علامت منفی این متغیر (نسبت سیلت به رس)، موجب افزایش مکش آب خاک در خلل و فرج ماتریکس خاک ( $h_1$ ) خواهد شد. ذرات رس خاک، خلل و فرج ریزتری نسبت به ذرات دیگر خاک ایجاد می‌کنند. بنابراین مکش آب خاک به دلیل رابطه معکوسی که با قطر خلل و فرج خاک دارد، افزایش خواهد یافت [۵].

با مشاهده شکل ۱ و جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که توابع انتقالی ایجاد شده توانسته‌اند منحنی مشخصه آب خاک را با دقتی پذیرفتنی برآورد کنند. با توجه به دشوار بودن و نیاز به صرف وقت و هزینه فراوان در روش‌های مستقیم اندازه‌گیری منحنی مشخصه آب خاک، نباید انتظار داشت منحنی مشخصه آب خاک تخمین زده شده با ویژگی‌های زودپافت خاک کاملاً منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده شود. از این رو استفاده از توابع انتقالی ایجاد شده و ویژگی‌های زودپافت خاک را می‌توان راهکاری مناسب برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک در نظر گرفت.

## منابع

۱. باقری ف.، بای‌وردی م. و بهرامی ح (۱۳۸۲) تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع در اراضی چایکاری با بافت رسی با استفاده از توابع انتقالی خاک. هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت.
۲. رسولزاده ع (۱۳۷۴) بررسی روش‌های مختلف شبیه‌سازی منحنی رطوبتی و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی. سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۳. رسولزاده ع.، نصیری ن.، عزیزی م.، بقائی ز. و رسولی ص (۱۳۸۸) ارزیابی توابع انتقالی مختلف

10. Brooks R H and Corey A T (1964) Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ. Hydrology Paper. 3, 27 p.
11. Campbell G S (1974) A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117: 311-314.
12. Dexter A R and Richard G (2009) Tillage of soils in relation to their bi-model pore size distributions. Soil & Tillage Research. 103: 113-118.
13. Dexter A R, Czyz E A and Richard G (2012) Equilibrium, non-equilibrium and residual water: Consequences for soil water retention. Geoderma. 177-178: 63-71.
14. Dexter A R, Czyz E A, Richard G and Reszkowska A (2008) A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore space in soil. Geoderma. 143: 243-253.
15. Jarvis N J, Zavattaro L, Rajkai K, Reynolds W D, Olsen P A, Gechan M M, Mecke M, Mohanty B, Leeds-Harison P B and Jacques D (2002) Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. Geoderma. 108: 1-17.
16. Rasoulzadeh A (2007) Three-Dimensional variably-saturated numerical modeling of groundwater management in a coastal aquifer (case study: Tavabe-e Arsanjan, Iran). PhD Thesis. Shiraz University. Shiraz, Iran.
17. Rasoulzadeh A (2010) Evaluation of water retention functions by developing a code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. J. of Food, Agric. & Environ. 8(2): 1180-1184.
18. Rawls W J and Brakensiek D L (1982) Estimating soil water retention from soil water properties. Trans. ASAE. 108: 166-171.
19. Salazar O, Westrom I and Joel A (2008) Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. Agric. Water Manage. 95: 1135-1143.
20. van Genuchten M Th (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
21. Wosten J H M, Pachepsky Y A and Rawls W J (2001) Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. J. of Hydrol. 251: 123-150.