



دانشگاه گوارز و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره چهارم، ۱۳۹۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## تأثیر پارامترهای توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز بر تخمین نقطه‌ای منحنی نگهداری آب خاک

\* حسین بیات<sup>۱</sup>، شب‌نم جوانشیر<sup>۲</sup>، ناصر دواتگر<sup>۳</sup> و محمدرضا نیشابوری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران، <sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی،

دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران، <sup>۳</sup>استادیار گروه خاکشناسی، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران،

<sup>۴</sup>استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۲۹

### چکیده

به‌علت تغییرپذیری بالا و پیچیدگی خاک به‌دست آوردن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌طور مستقیم مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است. در نتیجه لازم است با روش‌های غیرمستقیم تخمین زده شوند. در این مطالعه ۷۴ نمونه خاک از استان گیلان تهیه و متغیرهای توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت در مکش‌های ۲، ۵، ۳۳، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری گردید. پارامترهای فرکتالی برای توزیع اندازه ذرات خاک و خاک‌دانه‌های ریز و پارامترهای توزیع اندازه ذرات مدل فردلاند و همکاران محاسبه و از آن‌ها برای تخمین رطوبت در مکش‌های موردنظر استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک موجب بهبود تخمین رطوبت نگردد. استفاده از پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز موجب بهبود معنی‌دار تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف گردید و میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را در مرحله اعتبارسنجی تا ۶/۵ درصد بهبود بخشید. این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر ساختمان خاک در نگهداری رطوبت می‌باشد. اما استفاده از پارامترهای توزیع اندازه ذرات مدل فردلاند و همکاران تأثیر بیش‌تری در تخمین رطوبت داشت و RMSE را در مرحله اعتبارسنجی تا ۲۷ درصد بهبود بخشید. بهترین تخمین در مکش ۵ کیلوپاسکال مشاهده شد که ضریب تعیین مرحله ایجاد ۰/۳۶ افزایش یافت. شاید علت آن تعداد

\* مسئول مکاتبه: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

بیش‌تر پارامترهای مدل فردلاند و همکاران و شبیه‌سازی دقیق‌تر توزیع اندازه ذرات خاک باشد. به‌طورکلی استفاده از پارامترهای مدل‌های توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز موجب بهبود تخمین منحنی نگهداری آب خاک می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** توابع انتقالی، توزیع اندازه ذرات خاک، خاک‌دانه‌های ریز، مدل فردلاند

### مقدمه

آگاهی از خصوصیات هیدرولیکی خاک برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی در هیدرولوژی، کشاورزی، هواشناسی، اکولوژی، حفاظت از محیط زیست (توماسلا و همکاران، ۲۰۰۳) و مدل‌های جریان آب و املاح مورد نیاز است (پن و همکاران، ۲۰۱۲). منحنی نگهداری آب خاک (SWRC)<sup>۱</sup> یکی از ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک در حالت غیراشباع است (والچاک و همکاران، ۲۰۰۶). این ویژگی نه تنها رطوبت خاک در مکش‌های مختلف را که در مدیریت آب خاک مهم است، نشان می‌دهد، بلکه ویژگی‌های دیگری مانند توزیع اندازه منافذ، تخلخل کل و رطوبت قابل استفاده خاک را نیز بیان می‌کند (راولز و همکاران، ۱۹۹۱؛ سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱). اندازه‌گیری مستقیم این خصوصیات گران و بزرگ وجود ندارد (نمس و همکاران، ۲۰۰۹). به همین دلیل روش‌های غیرمستقیم در تخمین خواص هیدرولیکی معمولاً ترجیح داده می‌شود (فرخیان‌فیروزی و همایی، ۲۰۰۵).

به‌دلیل نیازهای متواتر به تخمین SWRC برای کاربردهای مختلف تلاش‌های زیادی برای به‌دست آوردن آن از داده‌های زودیافت انجام شده است (شاه و همکاران، ۱۹۸۸). تخمین غیرمستقیم پارامترهای هیدرولیکی خاک از روی داده‌های زودیافت و یا داده‌هایی که موجود هستند بخش مهمی از تحلیل داده‌های خاک را تشکیل می‌دهد (پاچپسکی و راولز، ۱۹۹۹). روش‌های غیرمستقیم شامل توابع انتقالی، مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک و روش‌های حل معکوس می‌باشد.

در سال‌های اخیر استفاده از توابع انتقالی (PTFs)<sup>۲</sup> برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافته است. توابع انتقالی را براساس روش‌های تخمین می‌توان به ۳ گروه توابع نقطه‌ای، توابع پارامتریک و توابع فیزیکی تقسیم نمود:

1- Soil Water Retention Curve

2- Pedotransfer Functions

۱) توابع انتقالی نقطه‌ای: این توابع، روابط رگرسیونی هستند که معمولاً مقدار رطوبت را در پتانسیل ماتریک معین برآورد می‌کنند. نمونه‌هایی از این توابع توسط ووستن و همکاران (۲۰۰۱) و فرخیان‌فیروزی و همایی (۲۰۰۵) گزارش شده است.

۲) توابع انتقالی پارامتریک: در این توابع رابطه بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک براساس یک مدل هیدرولیکی پارامتریک مانند مدل ون‌گنوختن که دارای تعداد معینی پارامتر است، قابل توصیف می‌باشد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و یا شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای آن برآورد می‌گردد (ووستن و همکاران، ۲۰۰۱). به‌عنوان مثال ووستن و همکاران (۲۰۰۱) ضرایب مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) را از این طریق برآورد نموده‌اند.

هر کدام از توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک براساس میزان اطلاعات قابل دسترس به ۲ دسته توابع انتقالی کلاسی و پیوسته تقسیم می‌شوند. توابع انتقالی کلاسی ویژگی‌های هیدرولیکی را برای کلاس‌های بافت مختلف برآورد می‌کنند. این توابع میانگینی از ویژگی‌های هیدرولیکی هر کلاس بافتی خاک را به‌صورت جدول ارائه می‌کنند (شاپ و همکاران، ۲۰۰۱). توابع انتقالی پیوسته ویژگی‌های مشخصی از خاک را به‌عنوان تابعی پیوسته از یک یا چند متغیر اندازه‌گیری شده، برآورد می‌کنند. برای مثال، این توابع ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با استفاده از معادله‌های رگرسیونی به خصوصیات پایه‌ای خاک مانند توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی مرتبط می‌نمایند. در روش پیوسته تخمین برای هر نقطه از مثلث بافت خاک امکان‌پذیر است (ساکستن و راولز، ۲۰۰۶).

۳) توابع فیزیکی: در این مدل‌ها از داده‌های توزیع اندازه ذرات (PSD)<sup>۱</sup>، جرم مخصوص ظاهری (BD)<sup>۲</sup> و جرم مخصوص حقیقی ذرات خاک برای تخمین SWRC استفاده می‌کنند. مثال مشخص توابع فیزیکی مدل آریا و پاریس (۱۹۸۱) می‌باشد.

تاکنون پارامترهای متعددی برای تخمین SWRC در PTF ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارتند از: بافت خاک، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری خاک (گوپتا و لارسون، ۱۹۷۹)، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (وریکن و همکاران، ۱۹۹۲)، اطلاعات افق‌های ژنتیکی خاک (تیت‌جی و تاپکن‌هینریش، ۱۹۹۳)، تخلخل مؤثر (شاپ و همکاران، ۱۹۹۸)، شکل و اندازه خاک‌دانه‌ها (کواک‌کواک و بولتینک، ۱۹۹۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی (پاچسکی و راولز، ۱۹۹۹). خداوردیلو و همکاران (۲۰۱۱) با ایجاد PTF ها برای برخی از خاک‌های آهکی نشان دادند که  $\text{CaCO}_3$  بر دقت PTF ها در تخمین

1- Particle Size Distribution

2- Bulk Density

منحنی رطوبتی تأثیر نمی‌گذارد. تات و همکاران (۲۰۱۲) از  $\text{CaCO}_3$  مقدار نمک محلول، pH و کلاس‌های زیرگروه خاک برای تخمین SWRC در خاک‌های شور استفاده کردند. هر چند که ایجاد PTF ها در مقایسه با اندازه‌گیری مستقیم بسیار ساده می‌باشد اما انتخاب متغیرهای ورودی و ترجیح آن‌ها نسبت به یکدیگر از چالش‌های اساسی در توسعه PTF هاست (ووستن و همکاران، ۲۰۰۱).

اخیراً استفاده از ابعاد فرکتالی توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌ها در مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (تیلر و ویت‌کرفت، ۱۹۹۰؛ ریو و اسپوزیتو، ۱۹۹۱؛ کراوفورد، ۱۹۹۴؛ کراوفورد و همکاران، ۱۹۹۵). اما توزیع اندازه ذرات در اجزای محدودی از اندازه ذرات خاک اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین برای ایجاد یک منحنی پیوسته از اجزای محدود ذرات خاک از مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود (بوچان و همکاران، ۱۹۹۳؛ میلان و همکاران، ۲۰۰۳؛ فردلند و همکاران ۲۰۰۰). یکی از کاراترین این مدل‌ها، مدل ۴ پارامتری فردلند و همکاران (۲۰۰۰) است.

میلان و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که پارامترهای فرکتالی خاک‌دانه‌ها اثر عوامل خارجی مانند خاک‌ورزی و به‌سازی بر روی ساختمان خاک را منعکس می‌کنند و ابزار مناسبی برای تشخیص تأثیر عملیات مدیریتی بر ویژگی‌های فیزیکی - کشاورزی خاک‌های ررتی‌سول می‌باشند.

میلان و همکاران (۲۰۰۳) با مطالعه بر روی ماهیت فرکتالی خاک‌های با بافت‌های مختلف نشان دادند که بعد فرکتالی (D) برای PSD، همبستگی خطی معنی‌داری با مقادیر رس دارد. D با افزایش مقدار رس افزایش و با افزایش مقدار شن کاهش یافت.

توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها رابطه نزدیک با توزیع اندازه منافذ خاک دارد (وو و همکاران، ۱۹۹۰؛ فیلگورا و همکاران، ۱۹۹۹). ایجاد ارتباط بین ساختمان خاک با ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، موضوع مهمی برای درک و مدیریت کارکرد خاک می‌باشد. هندسه فرکتال ابزاری مناسب برای توصیف ساختمان خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است (گیمنز و همکاران، ۱۹۹۷؛ باوای و همکاران، ۱۹۹۸). کراوفورد و همکاران (۱۹۹۵) بعد فرکتال جرمی توده خاک را که از آنالیز تصاویر برش‌های نازک محاسبه شده بود با بعد فرکتالی SWRC مقایسه کرده و پیشنهاد کردند که بعد فرکتال جرمی خاک را می‌توان برای تخمین SWRC مورد استفاده قرار داد. بنابراین از نظر تئوری بعد فرکتال توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها رابطه نزدیکی با SWRC دارد و انتظار بر این است که استفاده از آن به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود صحت تخمین‌های مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف گردد.

وریکن و همکاران (۲۰۱۰) ایجاد پایگاه اطلاعاتی از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را پیشنهاد کردند که شامل تخمین‌گرهای جدید مانند ویژگی‌های ساختمانی خاک باشد. آن‌ها نشان دادند که استفاده موفق از ویژگی‌های ساختمانی در PTF ها نیازمند پارامترهایی است که تأثیر این ویژگی‌ها بر توابع هیدرولیکی خاک را شرح دهد. با توجه به این نکته، توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها شاخص خوبی برای ساختمان خاک است. پس برازش یک مدل فرکتالی مناسب بر داده‌های توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها و استفاده از پارامترهای آن برای تخمین منحنی رطوبتی یک گام رو به جلو در ایجاد PTF ها است. بر پایه بررسی منابع انجام شده (وو و همکاران، ۱۹۹۰؛ گیمنز و همکاران، ۱۹۹۷؛ باوای و همکاران، ۱۹۹۸؛ فیلگورا و همکاران، ۱۹۹۹) بر خلاف رابطه نزدیک پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌ها با خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها هنوز از این پارامترها (به‌ویژه پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز (MASD)<sup>۱</sup>) برای تخمین SWRC با روش‌های رگرسیونی استفاده نشده است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی بهبود تخمین نقطه‌ای SWRC با استفاده از پارامترهای فرکتالی PSD و خاک‌دانه‌های ریز و پارامترهای توزیع اندازه ذرات مدل فردلاندر و همکاران (۲۰۰۰) بود.

### مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش تعداد ۷۴ نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده از لایه‌های سطحی و زیرسطحی نقاط مختلف استان گیلان تهیه گردید. نمونه‌برداری در لایه‌های سطحی از عمق ۱۰-۳۵ سانتی‌متر و در لایه‌های زیرسطحی از عمق ۲۰-۴۵ سانتی‌متر صورت گرفت. PSD با استفاده از روش الک خشک به مدت ۳ دقیقه و هیدرومتر اندازه‌گیری شد. برای این منظور ابتدا خاک را هوا خشک کرده و سپس از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و ذرات در دامنه‌های قطری: شن خیلی ریز (۰/۱-۰/۰۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۵-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر) و شن خیلی درشت (۲-۱ میلی‌متر) جداسازی شد و تعداد ۹ تا ۱۴ نقطه از منحنی PSD در دامنه قطری کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر تعیین گردید. برای به‌دست آوردن اجزای ذرات شن از الک و برای به‌دست آوردن اجزای ذرات سیلت و رس از روش هیدرومتری استفاده شد (گی و ار، ۲۰۰۲).

1- Micro-Aggregate Size Distribution

برای تعیین MASD از روش مقاله میلان و همکاران (۲۰۰۷) که همان روش PSD خاک (۲-۰ میلی‌متر) می‌باشد، استفاده شد، با این تفاوت که مرحله پراکنش انجام نشد. همچنین برای تفکیک خاک‌دانه‌هایی به قطر ۲-۰/۰۵ میلی‌متر به جای الک خشک از الک تر به مدت ۵ دقیقه استفاده گردید. جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد (گروسمن و رینش، ۲۰۰۲).

مقدار رطوبت در مکش‌های ۲ و ۵ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه جعبه شن<sup>۱</sup> و در مکش‌های ۱۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۳ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری برای ۷۴ نمونه برداشت شده تعیین گردید (دین و هاپمنز، ۲۰۰۲).

برازش مدل‌ها بر توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز: مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) به دو دلیل برای برازش بر داده‌های PSD در این پژوهش استفاده شد: اول این‌که غالب خاک‌های استفاده شده در این پژوهش دارای بافت متوسط و ریز بودند و این مدل قابلیت برازش بهتری در خاک‌های ریزتر را دارد. دوم این‌که براساس مطالعات هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) در مقایسه با ۷ مدل بررسی شده بالاترین دقت را داشت.

برازش مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) بر داده‌های تجربی با استفاده از تابع Solver در نرم‌افزار Excel صورت گرفت و پارامترهای مدل به دست آمد.

$$P(d) = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{a_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right] \right\}^{m_{gr}}} \left\{ 1 - \frac{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d} \right) \right]^{\gamma}}{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d_m} \right) \right]^{\gamma}} \right\} \quad (1)$$

که در آن،  $P(d)$ : درصد تجمعی ذرات با قطر کوچک‌تر از  $d$  (میلی‌متر)،  $a_{gr}$  (میلی‌متر): اولین نقطه شکست منحنی،  $n_{gr}(-)$ : تندترین شیب منحنی،  $m_{gr}(-)$ : پارامتر شکل منحنی در قسمت پایین،  $d_m$  (میلی‌متر): کوچک‌ترین قطر ذرات مجاز در مدل،  $d_{rgr}$  (میلی‌متر): مقدار ذرات ریز را نشان می‌دهد (در بیش‌تر موارد برابر ۰/۰۰۱ میلی‌متر می‌باشد).

برای به دست آوردن ابعاد فرکتالی PSD و MASD مدل پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) از نرم افزار Datafit استفاده شد:

$$m(x \leq x_i) = (\alpha^{D-r})(L^{D-r})(x_i)^{r-D} \quad (2)$$

که در آن،  $m(x \leq x_i)$ : جرم تجمعی یا درصد تجمعی ذرات یا خاکدانه‌های با قطر کوچکتر یا مساوی  $x_i$ ،  $\alpha$ : نسبت تشابه،  $L$ : ثابت مدل است که تحت عنوان اندازه اولیه<sup>۱</sup> نام‌گذاری شده است و  $D$ : بعد فرکتالی می‌باشد. هنگامی که مدل بالا برای PSD یا MASD استفاده می‌شود پارامترهای آن به ترتیب با اندیس  $p$  یا  $a$  مشخص می‌گردند.

مراحل ایجاد توابع: ابتدا آزمون نرمال بودن متغیرها (Da,  $\alpha a$ , Lp, Dp,  $\alpha p$ , BD, Clay, Sand) متغیرها  $\theta_{100}$ ،  $\theta_{10}$ ،  $\theta_{33}$ ،  $\theta_0$ ،  $\theta_r$ ،  $d_{rgr}$ ،  $m_{gr}$ ،  $n_{gr}$ ،  $a_{gr}$ ، La تبدیل شدند. چون این متغیرها به سادگی نرمال نمی‌شدند به همین دلیل روابط رگرسیونی متعددی برای نرمال کردن آنها مورد بررسی قرار گرفت و ضرایب آن از طریق آزمون و خطا به دست آمد. چگونگی تبدیل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- روش نرمال کردن داده‌های غیرنرمال.

پارامتر	نوع رابطه	معادله	پارامتر	نوع رابطه	معادله
S	polynomial	$-0.0016 S^2 + 0.1688 S$	$a_{gr}$	logarithmic	$1/2005 \ln(a_{gr})$
BD	polynomial	$1/2607 BD^2 + 0.4801 BD$	$n_{gr}$	logarithmic	$3/0896 \ln(n_{gr})$
$\alpha p$	polynomial	$-14/936 \alpha p^2 + 35/577 \alpha p$	$m_{gr}$	polynomial	$-1/6846 m_{gr}^2 + 6/2392 m_{gr}$
Dp	linear	$22/942 Dp$	$d_{rgr}$	logarithmic	$0/7714 \ln(d_{rgr})$
Lp	polynomial	$-15/045 Lp^2 + 35/804 Lp$	$\theta_r$	polynomial	$-0/006\theta_r^2 + 0/1246\theta_r$
$\alpha a$	polynomial	$3/1333 \alpha a^2 - 1/876 \alpha a$	$\theta_0$	polynomial	$-0/006\theta_0^2 + 0/1265\theta_0$
Da	linear	$12/003 Da$	$\theta_{100}$	polynomial	$-0/007\theta_{100}^2 + 1/4774\theta_{100}$
La	polynomial	$2/5962 La^2 - 0/8588 La$			

سپس بر روی کل داده‌ها تبدیل استاندارد صورت گرفت تا از میانگین صفر و واریانس ۱ برخوردار باشند.

برای ایجاد توابع از ۷۴ نمونه،  $\frac{2}{3}$  برای ایجاد و  $\frac{1}{3}$  باقی‌مانده برای اعتبارسنجی توابع ایجاد شده استفاده گردید. انتخاب داده‌ها برای ایجاد و اعتبارسنجی به صورت تصادفی انجام شد. برای اطمینان از

#### 1- Initiator Size

نبود تفاوت معنی‌دار بین داده‌های ایجاد و اعتبارسنجی مقایسه میانگین (t-test) بین آن‌ها انجام شد (توماسلا و همکاران، ۲۰۰۳). روش رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی با نرم‌افزار Datafit برای ایجاد توابع انتقالی مورد استفاده قرار گرفت. در این نرم‌افزار تعداد زیادی مدل‌های خطی و غیرخطی وجود دارد که پس از مشخص کردن متغیرهای مستقل و وابسته نرم‌افزار اجرا می‌گردد. هر کدام از مدل‌ها که قابل برازش بر داده‌ها باشد با معیارهای خطا به ترتیب دقت نشان داده می‌شود. کاربرد براساس هدف موردنظر دقیق‌ترین و ساده‌ترین مدل را انتخاب می‌کند. متغیرهای درصد شن (S)، درصد رس (C)، BD، پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ( $\alpha_p$ , Dp و Lp) و خاک‌دانه‌های ریز ( $\alpha_a$ , Da و La) و پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) ( $a_{gr}$ ,  $n_{gr}$ ,  $m_{gr}$  و  $d_{gr}$ ) همگی به‌عنوان متغیرهای مستقل یا ورودی و مقادیر رطوبت در مکش‌های ۲، ۵، ۳۳، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به‌عنوان متغیرهای وابسته یا خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. ایجاد توابع در ۴ مرحله صورت گرفت. در مرحله اول فقط از ویژگی‌های پایه خاک (یعنی S، C و BD) به‌عنوان متغیر ورودی استفاده شد و رطوبت در مکش‌های مختلف تخمین زده شد. سپس در هر کدام از مراحل بعد متغیرهای جدیدی به جمع ورودی‌های مدل اضافه شدند، که در جدول ۲ به‌طور کامل نشان داده شدند.

جدول ۲- جزئیات توابع ایجاد شده در مراحل مختلف.

مرحله	متغیرهای ورودی برای هر مرحله	تابع انتقالی ایجاد شده
مرحله ۱	S <sup>s</sup> ، C و BD	PTF <sub>۱</sub>
مرحله ۲	S، C، BD، $\alpha_p$ ، Dp و Lp	PTF <sub>۲</sub>
مرحله ۳	S، C، BD، $\alpha_a$ ، Da و La	PTF <sub>۳</sub>
مرحله ۴	S، C، BD، $a_{gr}$ ، $n_{gr}$ ، $m_{gr}$ و $d_{gr}$	PTF <sub>۴</sub>

S<sup>s</sup>، C و BD به ترتیب درصد شن، رس و جرم مخصوص ظاهری؛  $\alpha_p$ ، Dp و Lp به ترتیب نسبت تشابه، بعد فرکتالی و ثابت مدل فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک؛  $\alpha_a$ ، Da و La به ترتیب نسبت تشابه، بعد فرکتالی و ثابت مدل فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها؛  $a_{gr}$ ،  $n_{gr}$ ،  $m_{gr}$  و  $d_{gr}$  به ترتیب اولین نقطه شکست منحنی، تندترین شیب منحنی، پارامتر شکل منحنی در قسمت پایین و مقدار ذرات ریز در مدل فردلاند را نشان می‌دهند.



برای بررسی صحت توابع انتقالی از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۱</sup>، ضریب تعیین (R<sup>۲</sup>)، معیار اطلاعات آکایک (AIC)<sup>۲</sup> (آکایک، ۱۹۷۴) و ضریب بهبود نسبی (RI)<sup>۳</sup> استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به این که مقادیر AIC تحت تأثیر تعداد داده استفاده شده در هر PTF می‌باشد و از طرف دیگر تعداد داده استفاده شده در هر PTF با توجه به در دسترس بودن داده، متفاوت بود، بنابراین مقادیر AIC با تقسیم شدن بر داده‌های استفاده شده در هر مرحله نرمال گردید.

ریشه میانگین مربعات خطا:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m - \theta_p)^2}{N}} \quad (۳)$$

ضریب تعیین:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m - \theta_p)^2}{\sum_{i=1}^N (\theta_m - \theta_{ma})^2} \quad (۴)$$

معیار اطلاعات آکایک:

$$AIC = N \ln \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m - \theta_p)^2}{N} \right] + 2n_p \quad (۵)$$

که در آن،  $\theta_m$ : مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده،  $\theta_p$ : مقدار رطوبت تخمین زده شده،  $\theta_{ma}$ : میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده،  $n_p$ : تعداد پارامترهای مدل که باید تخمین زده شوند و  $N$ : تعداد نمونه‌های خاک می‌باشد. ضریب بهبود نسبی از رابطه زیر تعیین شد:

$$RI = \frac{RMSE_1 - RMSE_i}{RMSE_1} \times 100 \quad i = ۲, ۳ \text{ یا } ۴ \quad (۶)$$

که در آن،  $RMSE_1$ : ریشه میانگین مربعات خطای PTF<sub>۱</sub> و  $RMSE_i$ : ریشه میانگین مربعات خطای PTF<sub>۲</sub> تا PTF<sub>۴</sub>.

- 
- 1- Root Mean Square Error
  - 2- Akaike Information Criterion
  - 3- Relative Improvement

## نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری: ویژگی‌های آماری همه متغیرهایی که به‌عنوان تخمین‌گر برای ایجاد PTF های رطوبت خاک در مدل‌ها وارد شدند برای مجموعه داده‌های استخراج و اعتبارسنجی به تفکیک در جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول شامل تمام متغیرهایی است که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده یا از طریق مدل‌های فرکتالی محاسبه گردیده‌اند. با دقت در اجزای بافت خاک یعنی درصد‌های شن و رس معلوم می‌گردد که میانگین درصد رس بیش‌تر از میانگین درصد شن است. ولی میانگین درصد سیلت از هر دو آن‌ها بیش‌تر است. بنابراین غالب خاک‌های استفاده شده در این پژوهش میان‌بافت و ریزبافت می‌باشند. توزیع نمونه‌ها در روی مثلث بافت خاک (شکل ۱) نیز تأییدی بر این نکته است که از ۷۴ نمونه استفاده شده ۲۶ نمونه دارای کلاس لومی رسی سیلتی، ۱۹ نمونه دارای کلاس لومی سیلتی، ۱۴ نمونه رسی سیلتی، ۶ نمونه دارای کلاس رسی، ۵ نمونه دارای کلاس لومی رسی، ۳ نمونه دارای کلاس لومی و ۱ نمونه دارای کلاس بافتی لومی شنی بودند. بنابراین کاربرد توابع ایجاد شده در این پژوهش برای محدوده داده‌های استفاده شده، قابل توصیه است. آنگارو و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که استفاده از PTF ها در محدوده داده‌های به‌کار گرفته شده برای ایجاد با صحت بیش‌تری همراه خواهد بود.

چون انتخاب داده‌ها برای ایجاد و اعتبارسنجی به‌صورت تصادفی انجام شد، محدوده تغییرات و میانگین متغیرها برای مجموعه داده‌های ایجاد و اعتبارسنجی مشابه است. نتایج مقایسه میانگین این دو مجموعه از طریق آزمون t (نتایج نشان داده نشده است) نشان داد که تفاوت بین آن‌ها از نظر هیچ کدام از متغیرها معنی‌دار نبود.

همبستگی خطی ساده بین داده‌های ورودی و خروجی در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان‌دهنده وجود همبستگی بین پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز و همچنین پارامترهای مدل فردلانند و همکاران (۲۰۰۰) با مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف می‌باشد که در برخی موارد معنی‌دار بود. شاید یکی از دلایل معنی‌دار نبودن برخی از این همبستگی‌ها رابطه پیچیده بین نگهداری رطوبت در مکش‌های مختلف با پارامترهای مدل‌های توزیع اندازه ذرات و خاک‌دانه‌های ریز باشد.

جدول ۳- ویژگی‌های آماری متغیرهای مجموعه داده‌های ایجاد و اعتبارسنجی.

OC (درصد)	$\theta_{100}$	$\theta_{90}$	$\theta_{80}$	$\theta_{70}$	$\theta_0$	$\theta_r$	$d_{gr}$	$m_{gr}$	$n_{gr}$	$a_{gr}$	$L_a$	$D_a$	$\alpha_a$	$L_p$	$D_p$	$ap$	BD گرم بر سانتی متر مکعب	C (درصد)	$S^2$ (درصد)	ایجاد	
																				$\theta_{100}$	$\theta_{90}$
۱/۹۵	۲۰/۷	۴۲/۵	۴۹/۷	۵۲/۵	۵۵/۱	۲۰/۶۵	۰/۸۳۳	۱/۴	۰/۰۲۹	۱/۱۳۳	۲/۸۰۳	۱/۱۳۳	۱/۱۳۳	۰/۷۸۱	۲/۸۱۴	۰/۷۸۲	۱/۲۷۵	۳۲	۱۵/۶	میانگین	
۱/۷۴	۲۰/۰۵	۴۳	۵۱/۱۳	۵۲/۴	۵۴/۴	۸/۶	۰/۸۱	۱/۲۴	۰/۰۲۶	۱/۱۳۳	۲/۸۹۳	۱/۱۳۱	۰/۸۰۳	۲/۸۵۹	۰/۸۰۴	۱/۲۷۳	۱/۲۷۳	۳۰	۱۷/۴	میانه	
۱/۵۴	۴/۹۳	۱۰/۶	۱۶/۵۵	۱۲/۷	۱۳/۲	۲۴/۳/۶	۰/۳۱۷	۰/۴۵۸	۰/۰۱۷	۰/۱۲۹	۰/۰۷۶	۰/۱۳۷	۰/۰۶۸	۰/۰۳۷	۰/۰۶۸	۰/۲۴۴	۰/۰۶۸	۱۰/۸	۷/۵	انحراف استاندارد	
۰/۰۴	۱۲/۴۱	۲۱	۳۳/۳۵	۲۴/۸	۲۵	۱۰	۰/۳۰۳	۰/۸۰۲	۰/۰۱	۰/۶۵۲	۲/۸۸	۰/۶۵۳	۰/۶۵۳	۲/۷۷۳	۰/۶۳	۰/۷۳۳	۰/۷۳۳	۱۳	۱	حداقل	
۱۳/۶	۳۱/۵	۷۴	۸۱/۴۶	۸۸/۰۷	۹۰/۶۴	۹۰/۰۰۱	۱/۷۵۶	۲/۶۶۷	۰/۰۸۷	۱/۴۳۵	۲/۹۵۴	۱/۴۰۴	۰/۸۹۸	۲/۹۳۲	۰/۸۹۱	۱/۷۰۱	۱/۷۰۱	۵۶	۳۶	حداکثر	
۴۳	۲۹	۴۰	۱۷	۴۰	۴۰	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۴۲	۴۲	۴۲	۴۳	۴۳	۴۳	تعداد	
اعتبارسنجی																					
۱/۴۹	۲۰/۷	۴۶/۲	۵۲/۳۳	۵۴/۶	۵۸/۱	۱۵/۱/۶	۰/۸۰۲	۱/۴۶۳	۰/۰۵۳	۱/۱۶۱	۲/۸۲۲	۱/۱۶۵	۰/۸۰۲	۲/۸۳۳	۰/۸۰۲	۱/۳۰۱	۱/۳۰۱	۳۴/۱	۱۷/۵	میانگین	
۱/۰۹	۱۹/۷	۴۲/۸	۴۹/۲۲	۵۲/۳	۵۳/۳	۳۳/۶	۰/۷۶۵	۱/۳۲۹	۰/۰۳۳	۱/۰۸۴	۲/۸۲۴	۱/۰۹۴	۰/۷۸۸	۲/۸۶۵	۰/۷۸۷	۱/۳۳۴	۱/۳۳۴	۳۳	۱۶	میانه	
۱/۱۷	۳/۸۷	۱/۶	۲۶/۵۲	۱۱/۳	۱۴/۷	۳۲۰/۳	۰/۳۶۴	۰/۴۷۱	۰/۰۹۱	۰/۱۲۹	۰/۰۶۳	۰/۱۳۳	۰/۱۲۴	۰/۰۴۹	۰/۱۶۵	۰/۳۳۶	۰/۳۳۶	۱۱/۶	۱۳/۸	انحراف استاندارد	
۰/۰۷	۱۷	۲۱/۶	۲۲/۶۱	۲۴/۹	۳۸/۲	۷/۷	۰/۳۲	۰/۱۷۷	۰/۰۱	۰/۹۲۸	۲/۸۱۴	۰/۹۳۳	۰/۶۴	۲/۳۳۸	۰/۶۴	۰/۹۳	۰/۹۳	۱۴	۴	حداقل	
۲/۴۶	۲۹/۷	۷۵/۸	۹۱/۳۳	۸۷/۱	۱۰۰/۲	۸۵/۲/۷	۱/۴۸۷	۲/۴۳۳	۰/۳۳۳	۱/۳۹	۲/۹۳۶	۱/۳۸۹	۱/۲۶۵	۲/۹۳۵	۱/۲۶۵	۱/۷۰۳	۱/۷۰۳	۵۸	۵۹	حداکثر	
۲۳	۱۶	۲۲	۱۰	۲۱	۲۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۲۲	۲۲	۲۲	۲۳	۲۳	۲۳	تعداد	

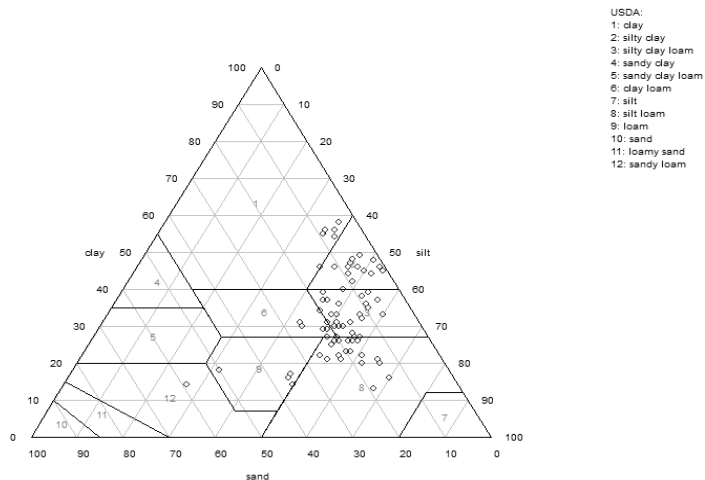
۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب درصد رطوبت حجمی در مکش‌های ۰، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و OC درصد کرنش آلی خاک است. بقیه علائم در زیر جدول ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۴- همبستگی بین داده‌های ورودی و خروجی.

	$\delta S$	Clay	BD	$\alpha p$	Dp	Lp	$\alpha a$	Da	La	$a_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{gr}$
$\theta_r$	-۰/۱۱۷	-۰/۰۶	۰/۰۸	-۰/۱۲	۰/۰۶	-۰/۱۲	-۰/۲۹*	۰/۰۷	-۰/۲۷	-۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۱۳	-۰/۱۴
$\theta_s$	-۰/۱۳۰	-۰/۰۵	۰/۰۸	-۰/۱۳	۰/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۲۹*	۰/۰۸	-۰/۲۷	-۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۱۲	-۰/۱۶
$\theta_{33}$	-۰/۳۳۶*	۰/۱۹	۰/۶۶*	-۰/۱۵	۰/۱۲	-۰/۱۵	-۰/۵۲*	۰/۰۶	-۰/۵۱*	-۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۰	-۰/۲۷*
$\theta_{100}$	-۰/۲۱۱	-۰/۰۰۵	۰/۱۹	-۰/۲۱	۰/۱۱	-۰/۲۱	-۰/۳۵*	۰/۰۹	-۰/۳۳*	-۰/۲۶*	۰/۰۴	۰/۱۳	-۰/۲۵
$\theta_{500}$	-۰/۳۱۵*	۰/۲۹*	۰/۳۳*	-۰/۲۸	۰/۳۷*	-۰/۳۷*	-۰/۰۱	۰/۱۲	-۰/۰۱	-۰/۱۹	۰/۰۶	-۰/۲۱	-۰/۰۲

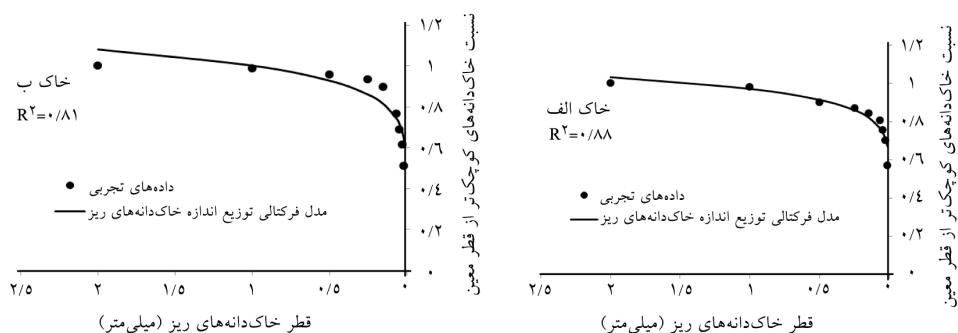
\* معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

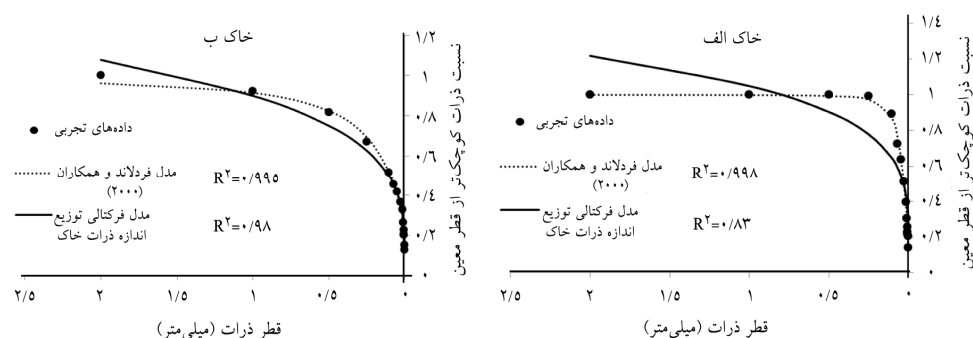
§ همه علائم در زیر جدول‌های ۲ و ۳ معرفی شده‌اند.



شکل ۱- توزیع ۷۴ نمونه خاک مطالعه شده در مثلث بافت خاک.

نمونه‌ای از برازش مدل پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز برای دو خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین نمونه‌ای از برازش مدل پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) و مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) بر توزیع اندازه ذرات خاک در دو خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که دقت برازش مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) نسبت به مدل فرکتالی پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) در هر دو خاک الف و ب بهتر بوده است. تقریباً چنین روندی برای تمامی خاک‌ها مشاهده گردید.





شکل ۳- دو مثال از برازش مدل پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) و مدل فردلانند و همکاران (۲۰۰۰) بر توزیع اندازه ذرات خاک در دو خاک الف و ب.

توابع ایجاد شده: برای ارزیابی صحت و قابلیت اعتماد توابع ایجاد شده از ۴ معیار  $AIC$ ،  $RMSE$ ،  $RI$  و  $R^2$  استفاده گردید. ضریب تعیین ( $R^2$ ) در ارزیابی اعتبار مدل‌ها می‌تواند فریب‌دهنده باشد و  $R^2$  نزدیک ۱ الزاماً دلالت بر انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده و کم‌تر بودن خطا نیست (بوچان و همکاران، ۱۹۹۳؛ کوزاک و همکاران، ۱۹۹۶). علاوه بر آن روند تغییرات معیار  $R^2$  نسبت به ۳ معیار دیگر دارای تفاوت‌هایی می‌باشد به همین دلیل در این پژوهش علاوه بر  $R^2$  برای گزینش مدل بهتر و تحلیل نتایج از آماره‌های  $RMSE$  و  $AIC$  که اعتبار بیشتری دارند، استفاده شد.

نتایج تخمین رطوبت در مکش‌های ۲، ۵، ۳۳، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در جدول ۵ ارائه شده است. مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده برای تخمین رطوبت در مکش‌های نام برده و برای هر ۴ تابع در جدول ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از ایجاد چند هم‌خطی برخی متغیرهای ورودی از بعضی  $PTF$  ها حذف گردید. استفاده از پارامترهای فرکتالی  $PSD$  به همراه شن، رس و جرم مخصوص ظاهری برای ایجاد  $PTF_2$  در مکش‌های مختلف نه تنها بهبود معنی‌داری را در تخمین رطوبت در هیچ مکشی ایجاد نکرد (جدول ۵)، بلکه در بیشتر موارد در هر ۲ مرحله ایجاد و اعتبارسنجی موجب کاهش صحت توابع ایجاد شده گردید و  $RMSE$  و  $AIC$  را افزایش داد. این نتیجه بر خلاف نتایج بیات و همکاران (۲۰۱۱) است که با افزودن پارامترهای فرکتالی مدل میلان و همکاران (۲۰۰۳) بهبود تخمین پارامترهای مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) را

گزارش کردند. همچنین تیلر و ویت‌کرفت (۱۹۹۲) و ریو و اسپوزیتو (۱۹۹۱) و کراوفورد و همکاران (۱۹۹۵) نیز رابطه نزدیک پارامترهای فرکتالی با SWRC را اثبات نمودند. شاید یکی از علت‌های نتیجه به دست آمده وجود همبستگی‌های بالا (در سطح ۵ درصد) بین اجزای بافتی شن و رس با پارامترهای فرکتالی PSD بود که کارایی افزودن پارامترهای فرکتالی PSD را بی‌اثر نموده است. چرا که همبستگی  $\alpha_p$ ،  $D_p$  و  $L_p$  با درصد شن به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۶۷- و ۰/۸۱ و با درصد رس به ترتیب ۰/۷۰-، ۰/۸۲ و ۰/۶۹- بود. دلیل دیگر می‌تواند ناتوانی مدل فرکتالی پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) در شبیه‌سازی PSD خاک‌های میان‌بافت و سنگین بافت باشد. چرا که میانگین ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ۷۴ نمونه استفاده شده در این پژوهش برابر با ۰/۷۶ بود که در مقایسه با نتایج بوچان و همکاران (۱۹۹۳) برای مدل‌های دیگر مانند مدل تک‌پارامتری جکی با میانگین  $R^2$  بالاتر از ۰/۹۶ و مدل لوگ نرمال دو پارامتری با میانگین  $R^2$  بالاتر از ۰/۹۸، تقریباً از صحت کم‌تری برخوردار است.

استفاده از پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز (MASD) برای ایجاد PTF<sub>۳</sub> به‌جز در مکش ۱۵۰۰ (در هر دو مرحله ایجاد و اعتبارسنجی) و مکش ۱۰۰ کیلوپاسکال در (مرحله اعتبارسنجی) در بقیه مکش‌ها موجب بهبود صحت PTF<sub>۳</sub> ها گردید، که در مرحله ایجاد ۲ و ۵ کیلوپاسکال معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) بود. پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز (MASD) شاخصی از اثر ساختمان خاک بر رطوبت نگهداری شده در خاک در مکش‌های کم است. این نتیجه مطابق با نتایج بیات و همکاران (۲۰۱۱) است که افزودن پارامترهای فرکتالی خاک‌دانه‌ها منجر به بهبود تخمین پارامترهای مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) گردید.

نکته قابل‌توجه این است که با افزایش مکش میزان بهبود صحت توابع ایجاد شده (PTF<sub>۳</sub>) هر مکش در جدول ۵) کاهش یافته است. چرا که پارامترهای فرکتالی MASD در واقع ساختمان خاک را کمی می‌کنند و اثر ساختمان خاک در نگهداری رطوبت با افزایش مکش کاهش می‌یابد (هیلل، ۱۹۹۸).

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۰)، شماره (۴) ۱۳۹۲

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی صحت برآورد PTF های ایجاد شده برای تخمین رطوبت در ۴ مکش موردنظر.

$\theta_p$					$\theta_s$					
$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	
ایجاد					ایجاد					
۰/۱۰	۱۱/۴		۴/۹۲	۴۰	۰/۱۲	۹/۹		۴/۶۴	۴۰	PTF <sub>۱</sub>
۰/۱۱	۱۱/۸	-۳/۸	۵	۳۸	۰/۱۸	۹/۹	-۰/۴	۴/۶۵	۳۸	PTF <sub>۲</sub>
۰/۳۷	۸/۲	۲۸/۲	۴/۲۹°	۲۴	۰/۲۸	۸/۶	۱۲/۸	۴/۳۹°	۲۴	PTF <sub>۳</sub>
۰/۳۴	۹/۳	۱۸/۲	۴/۵۳°	۳۴	۰/۴۶	۷/۴	۲۵/۲	۴/۰۶°	۳۴	PTF <sub>۴</sub>
اعتبارسنجی					اعتبارسنجی					
۰/۱۷	۱۳/۵		۵/۳۱	۲۱	۰/۲۳	۱۱/۷		۵/۰۱	۲۱	PTF <sub>۱</sub>
۰/۲۲	۱۴/۶	-۷/۵	۵/۴۵	۲۱	۰/۳۱	۱۲/۸	-۱۰/۳	۵/۲	۲۱	PTF <sub>۲</sub>
۰/۲۳	۱۲/۷	۶/۵	۵/۲۲	۱۴	۰/۲۱	۱۱/۴	۲/۱	۵/۰۱	۱۴	PTF <sub>۳</sub>
۰/۱۸	۱۱/۶	۱۴/۶	۵/۰۰°	۱۹	۰/۳۵	۸/۵	۲۷	۴/۳۹°	۱۸	PTF <sub>۴</sub>
$\theta_{۳۳}$					$\theta_{۱۰۰}$					
$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	
ایجاد					ایجاد					
۰/۶۸	۹/۸		۴/۵۶	۱۷	۰/۲۳	۸/۳		۴/۲۸	۴۰	PTF <sub>۱</sub>
۰/۸۵	۶/۷	۳۱/۳	۴/۳۹°	۱۷	۰/۱۸	۱۰/۷	-۲۹	۴/۷۹	۴۳	PTF <sub>۲</sub>
۰/۶۷	۷/۸	۲۰/۰۰	۴/۱۱°	۱۳	۰/۳۵	۷/۶	۸/۳	۴/۱۴	۲۳	PTF <sub>۳</sub>
۰/۸۷	۶/۳	۳۵/۹	۳/۶۷°	۱۳	۰/۵۰	۵/۴	۳۵/۲	۴/۴۳°	۳۰	PTF <sub>۴</sub>
اعتبارسنجی					اعتبارسنجی					
۰/۷۶	۱۸/۰۰		۵/۷۸	۱۰	۰/۱۴	۱۱/۵		۴/۹۷	۲۲	PTF <sub>۱</sub>
۰/۷۸	۲۴/۹	-۳۸/۴	۶/۴۳	۱۰	۰/۱۸	۱۷/۶	-۵۳/۶	۵/۸۲	۲۳	PTF <sub>۲</sub>
۰/۸۰	۱۷/۱	۵/۰۰	۵/۶۷	۸	۰/۲۱	۱۵/۳	-۳۳/۹	۵/۶۱	۱۳	PTF <sub>۳</sub>
۰/۸۰	۲۱/۴	-۱۹/۲	۶/۱۳	۷	۰/۴۱	۹/۱	۲۰/۷	۴/۵۳°	۱۷	PTF <sub>۴</sub>
$\theta_{۱۵۰}$					$\theta_{۱۵۰}$					RMSE
$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	$R^2$	RMSE	RI (درصد)	AIC	N	
ایجاد					ایجاد					
۰/۴۹	۳		۲/۲۴	۲۹	۰/۴۹	۳		۲/۲۴	۲۹	PTF <sub>۱</sub>
۰/۵۴	۲/۹	۳	۲/۱۸	۲۹	۰/۵۴	۲/۹	۳	۲/۱۸	۲۹	PTF <sub>۲</sub>
۰/۵۸	۳	-۰/۷	۲/۲۸	۲۲	۰/۵۸	۳	-۰/۷	۲/۲۸	۲۲	PTF <sub>۳</sub>
۰/۵۴	۲/۷	۸/۵	۲/۰۷°	۲۸	۰/۵۴	۲/۷	۸/۵	۲/۰۷°	۲۸	PTF <sub>۴</sub>
اعتبارسنجی					اعتبارسنجی					
۰/۳۹	۲/۶		۲/۰۵	۱۶	۰/۳۹	۲/۶		۲/۰۵	۱۶	PTF <sub>۱</sub>
۰/۴۸	۲/۷	-۴/۸	۲/۱۶	۱۴	۰/۴۸	۲/۷	-۴/۸	۲/۱۶	۱۴	PTF <sub>۲</sub>
۰/۶۷	۳/۲	-۲۳/۱	۲/۵	۱۳	۰/۶۷	۳/۲	-۲۳/۱	۲/۵	۱۳	PTF <sub>۳</sub>
۰/۲۵	۲/۵	۳	۲	۱۵	۰/۲۵	۲/۵	۳	۲	۱۵	PTF <sub>۴</sub>

$\theta_p$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{۳۳}$ ,  $\theta_{۱۰۰}$  و  $\theta_{۱۵۰}$  به ترتیب رطوبت حجمی در مکش‌های ۵، ۳۳، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، AIC: معیار اطلاعات آکایک، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، RI: ضریب بهبود نسبی و N: تعداد نمونه‌های خاک در هر PTF می‌باشند.  
\* نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین هر کدام از PTF ها با PTF<sub>۱</sub> یا مرحله اول می‌باشد (در سطح ۵ درصد).



جدول ۶- شکل معادله‌های توابع ایجاد شده.

$\theta_3$	شکل معادله	$\theta_2$	شکل معادله
PTF <sub>1</sub>	$-0.1957 * S - 0.3078 * Clay + 0.229037 * BD - 0.1296$	PTF <sub>1</sub>	$-0.2581 * S - 0.2992 * Clay + 0.2726 * BD - 0.2188$
PTF <sub>2</sub>	$-0.05795 * S + 0.2076 * BD - 0.03295$	PTF <sub>2</sub>	$-0.802 * S + 0.2485 * BD + 0.302 * \alpha p - 0.267$
	$* \alpha p - 0.2337 * Dp - 0.1021 \xi$		$* Dp - 0.188$
PTF <sub>3</sub>	$0.201 * S - 0.309 * Clay + 0.219 * BD - 2.763 * \alpha a + 0.215 * Da + 0.186$	PTF <sub>3</sub>	$0.057 * S - 0.30 * Clay + 0.209 * BD - 2.76 \xi$
PTF <sub>4</sub>	$0.05 \xi * S - 1.352 * Clay + 0.226 * BD - 1.327 * a_{gr} - 0.407 * n_{gr} - 1.241 * m_{gr} - 0.766 * d_{gr} - 0.133$	PTF <sub>4</sub>	$0.308 * S - 2.004 * Clay + 0.331 * BD - 1.05 \xi * a_{gr} - 0.754 * n_{gr} - 1.862 * m_{gr} - 0.767 * d_{gr} - 0.225$
$\theta_{33}$		$\theta_{11}$	
PTF <sub>1</sub>	$-0.2047 * S - 0.2976 * Clay + 0.7707 * BD + 0.3009$	PTF <sub>1</sub>	$-0.2306 * S - 0.033 * Clay + 0.426 * BD - 0.1082$
PTF <sub>2</sub>	$\exp(-1.072 * S + 0.767 * BD + 1.723 * \alpha p - 1.71 \xi * Dp + 0.0507)$	PTF <sub>2</sub>	$\exp(-0.241 * S + 0.458 * BD + 0.207 * \alpha p - 0.098 * Dp - 0.11 \xi)$
PTF <sub>3</sub>	$-0.211 * S - 0.268 * Clay + 0.791 * BD - 0.902 * \alpha a - 0.207 * Da + 0.35 \xi$	PTF <sub>3</sub>	$\exp(0.105 * S - 0.106 * Clay + 0.095 * BD - 3.331 * \alpha a - 0.18 * Da + 0.302)$
PTF <sub>4</sub>	$-1.911 * S + 0.041 * Clay + 1.056 * BD + 1.959 * a_{gr} - 0.108 * n_{gr} + 1.258 * m_{gr} + 0.05 * d_{gr} + 0.31 \xi$	PTF <sub>4</sub>	$0.201 * S - 1.247 * Clay + 0.463 * BD - 0.91 * a_{gr} - 0.748 * n_{gr} - 1.335 * m_{gr} - 0.588 * d_{gr} + 0.052$
$\theta_{100}$			
PTF <sub>1</sub>	$-0.1909 * S + 0.7707 * Clay + 0.771 * BD + 0.1979$		
PTF <sub>2</sub>	$-0.328 * S + 0.046 * BD - 3.215 * \alpha p - 1.128 * Dp + 0.23 \xi$		
PTF <sub>3</sub>	$-0.239 * S + 0.902 * Clay - 0.87 * BD + 1.973 * \alpha a + 0.047 * Da + 0.295$		
PTF <sub>4</sub>	$-0.105 * S + 1.253 * Clay + 0.37 * BD + 0.483 * a_{gr} + 0.27 * n_{gr} + 0.529 * m_{gr} + 0.261 * d_{gr} + 0.25$		

<sup>S</sup> همه علائم در زیر جدول‌های ۲ و ۳ معرفی شده‌اند.

استفاده از پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) در تمامی مکش‌ها (به‌جز در مرحله اعتبارسنجی  $\theta_{33}$  و  $\theta_{100}$ ) موجب بهبود معنی‌دار صحت تخمین‌ها گردید (جدول ۵). تابع انتقالی PTF<sub>4</sub> که از ترکیب پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) و دیگر خواص پایه شن، رس و جرم مخصوص ظاهری استفاده می‌کند دارای بیش‌ترین میزان بهبود نسبی (RI) در ۲ مرحله ایجاد و اعتبارسنجی، در مکش‌های متفاوت بوده است. تخمین SWRC از روی اجزای PSD توسط آریا و

پاریس (۱۹۸۱) و آریا و همکاران (۱۹۹۹a) و آریا و همکاران (۱۹۹۹b) انجام شده است. هوانگ و پاورز (۲۰۰۳) نیز با روش آریا و پاریس و با استفاده از مدل‌های غیرخطی PSD، منحنی SWRC را تخمین زدند و نتیجه‌گیری کردند که برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی از روی PSD روابط غیرخطی نسبت به روابط خطی، نتایج بهتری را ارائه می‌کند. بنابراین از نظر تئوری رابطه نزدیکی بین PSD و SWRC وجود دارد. در واقع این نتیجه رابطه نزدیک پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) با SWRC را نشان می‌دهد. از سوی دیگر مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) دارای ۴ پارامتر بوده و با صحت بیشتری (با میانگین  $R^2$  برابر با ۰/۹۹۶) PSD را شبیه‌سازی می‌کند. از سوی دیگر کارایی مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) با افزایش رس خاک افزایش می‌یابد (فردلاند و همکاران، ۲۰۰۰؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۲). با توجه به این‌که بیش‌تر خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش دارای بافت‌های میان بافت تا سنگین بافت بودند، به همین علت استفاده از پارامترهای این مدل در تخمین SWRC نتیجه بهتری نسبت به استفاده از پارامترهای فرکتالی مدل پریر و بیرد (۲۰۰۲) و پریر و بیرد (۲۰۰۳) داشته است. بنابراین لازم است در انتخاب مدل‌های PSD برای استفاده از پارامترهای آن‌ها در تخمین SWRC به ویژگی‌های مدل، صحت آن و نوع خاک‌های مورد مطالعه توجه نمود.

در ایجاد مدل‌های رگرسیونی وقتی که از داده‌های استاندارد شده استفاده شود؛ ضرایب رگرسیونی به‌دست آمده برای هر متغیر مستقل نشان‌دهنده میزان تأثیر آن متغیر مربوطه در تخمین خروجی خواهد بود. بنابراین ضرایب رگرسیونی گزارش شده در جدول ۶ نشان‌دهنده حساسیت نسبی خروجی هر تابع به متغیرهای مستقل مربوطه می‌باشد. در توابع انتقالی ۳ و ۴ اضافه کردن پارامترهای فرکتالی خاک‌دانه‌های ریز و پارامترهای فرکتالی مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) موجب بهبود تخمین‌ها گردید به همین دلیل تحلیل تأثیر پارامترها هم فقط برای آن‌ها صورت گرفت. در تمامی مکش‌ها در  $PTF_3$  مجموع ضرایب رگرسیونی پارامترهای فرکتالی خاک‌دانه‌های ریز بیش‌تر از مجموع ضرایب رگرسیونی اجزای بافتی خاک است. این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر پارامترهای فرکتالی خاک‌دانه‌های ریز در مقایسه با اجزای بافتی خاک مانند شن و رس در تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف می‌باشد. در  $PTF_4$  نیز در تمامی مکش‌ها مجموع ضرایب رگرسیونی پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) بیش‌تر از مجموع ضرایب رگرسیونی اجزای بافتی خاک است. این نتیجه نیز نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر پارامترهای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) در مقایسه با اجزای بافتی خاک مانند شن و رس در تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف می‌باشد. حساسیت SWRC به تخمین‌گرهای مختلف در منابع

متفاوت گزارش شده است (راولز و همکاران، ۲۰۰۳؛ میناسنی و همکاران، ۲۰۰۴). اما در مورد تأثیر پارامترهای فرکتالی در تخمین SWRC تنها نتایجی توسط بیات و همکاران (۲۰۱۱) گزارش شده است که نشان دادند پارامترهای فرکتالی تأثیر قابل توجهی در تخمین SWRC دارند.

### نتیجه گیری

در این پژوهش از پارامترهای فرکتالی و غیرفرکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های ریز برای تخمین رطوبت در مکش‌های ۲، ۵، ۳۳، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده شد و صحت مدل‌ها در ۴ تابع انتقالی با هم مقایسه گردید. انجام این پژوهش براساس تشابه منحنی‌های PSD، توزیع اندازه خاکدانه‌ها و توزیع اندازه منافذ که نشان‌دهنده SWRC است صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که برای تخمین SWRC از روی مدل‌های PSD، مدلی باید انتخاب شود که بالاترین دقت برازش بر PSD خاک را داشته باشد. علاوه بر این با توجه به این‌که مدل‌های PSD متفاوت در خاک‌های مختلف قابلیت برازش متفاوتی دارند، بنابراین انتخاب مدل PSD برای تخمین SWRC متناسب با خاک‌های مربوطه صورت گیرد. همچنین براساس نتایج به دست آمده رابطه قوی بین توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز و SWRC وجود داشته و استفاده از پارامترهای مدل‌های توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز برای تخمین SWRC مؤثر و مفید می‌باشد. بنابراین از تشابه منحنی‌های PSD، توزیع اندازه خاکدانه‌ها و SWRC می‌توان برای تخمین یکی از دیگری استفاده نمود، مشروط بر این‌که مدل‌های دقیق‌تر و مناسب‌تری برای آن‌ها استفاده شود. در مجموع استفاده از پارامترهای فرکتالی خاکدانه‌های ریز و پارامترهای PSD مدل فردلاندر در تخمین نقطه‌ای SWRC مفید بوده و قابل توصیه می‌باشند.

### منابع

1. Akaike, H. 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. IEEE Transactions on Automatic Control AC. 19: 716-723.
2. Arya, L.M., and Paris, J.F. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1023-1030.
3. Arya, L.M., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., and Shouse, P.J. 1999a. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle size distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 510-519.
4. Arya, L.M., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., and Shouse, P.J. 1999b. Relation between hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1063-1070.

5. Bavaye, P., Parlang, J.Y., and Stewart, B.A. 1998. Fractals in soil science. Advances in soil science. CRC Press, Boca Raton, FL.
6. Bayat, H., Neyshabouri, M.R., Mohammadi, K., and Nariman-Zadeh, N. 2011. Estimating water retention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs. *Pedosphere*, 21: 107-114.
7. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper no. 3. Colorado State Univ, Fort Collins, CO. USA.
8. Buchan, G.D., Grewal, K.S., and Robson, A.B. 1993. Improved Models of Particle-Size Distribution: An Illustration of Model Comparison Techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 901-908.
9. Crawford, J. 1994. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil. *Eur. J. Soil Sci.* 45: 493-502.
10. Crawford, J.W., Matsui, N., and Young, I.M. 1995. The relation between the moisture release curve and the structure of soil. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 369-375.
11. Dane, J.H., and Hopmans, J.W. 2002. Pressure plate extractor. P 688-690, In: Warren, A.D. (ed) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America Inc.
12. Farrokhiyan Firuzi, A., and Homaei, M. 2005. Predicting water retention curve of gypsiferous soil using the derived point pedotransfer functions. *J. Agric. Engin. Res.* 6: 24. 129-142.
13. Filgueira, R.R., Pachepsky, Ya.A., Fournier, L.L., Sarli, G.O., and Aragon, A. 1999b. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling. *Soil Sci.* 164: 217-223.
14. Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., and Wilson, G.W. 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Can. Geotech. J.* 37: 817-827.
15. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-Size Analysis. In: Warren, A.D. (ed) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America Inc, Pp: 255-295.
16. Giménez, D., Perfect, E., Rawls, W.J., and Pachepsky, Ya. 1997. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: A review. *Eng. Geol.* 48: 161-183.
17. Grossman, R.B., and Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. P 201-228, In: Warren, A.D. (ed) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America Inc.
18. Gupta, S.C., and Larson, W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
19. Hillel, D. 1998. *Introduction to environmental soil physics.* Elsevier Science (USA), 494p.
20. Hwang, S.I., Lee, K.P., and Powers, S.E. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1143-1150.
21. Hwang, S.I., and Powers, S.E. 2003. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1103-1112.

22. Khodaverdiloo, H., Homae, M., van Genuchten, M.Th., and Ghorbani Dashtaki, Sh. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol.* 399: 93-99.
23. Koekkoek, E.J.W., and Booltink, H. 1999. Neural network models to predict soil water retention. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 489-496.
24. Kozak, E., Pachepsky, Y.A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z., and Stepniewski, W. 1996. A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Sci. Am. J.* 60: 1291-1297.
25. Millan, H., Gonzalez-Posada, M., and Benito, R.M. 2002. Fragmentation fractal dimensions of vertisol samples: influence of sieving time and soil pretreatment. *Geoderma*, 109: 75-83.
26. Millan, H., Gonzales-Posada, M., Aguliar, M., Dominguez, J., and Céspedes, L. 2003. On the fractal scaling of soil data, particle-size distributions. *Geoderma*, 117: 117-128.
27. Millan, H., Gonzalez-Posada, M., Morilla, A.A., and Perez, E. 2007. Self-similar organization of Vertisol microstructure: A pore-solid fractal interpretation. *Geoderma*, 138: 185-190.
28. Minasny, B., Hopmans, J.W., Harter, T., Eching, S.O., Tuli, A., and Denton, M.A. 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 417-429.
29. Nemes, A., Timlin, D.J., Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J. 2009. Evaluation of the Rawls et al. (1982) pedotransfer functions for their applicability at the U.S. National Scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 5. 1638-1645.
30. Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1748-1757.
31. Pan, F., Pachepsky, Y., Jacques, D., Guber, A., and Hill, R.L. 2012. Data assimilation with soil water content sensors and pedotransfer functions in soil water flow modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 3. 829-844.
32. Perrier, E., and Bird, N. 2002. Modelling soil fragmentation: the PSF approach. *Soil Tillage Res.* 64: 91-99.
33. Perrier, E.M.A., and Bird, N.R.A. 2003. The PSF model of soil structure: a multiscale approach. P 1-18, In: Pachepsky, Ya., Radcliffe, D.E., and Selim, H.M. (Eds.), *Scaling Methods in Soil Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL.
34. Rawls, W.J., Gish, T.J., and Brakenzieck, D.L. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16: 123-134.
35. Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M., and Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116: 61-76.
36. Rieu, M., and Sposito, G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties. I. Theor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1231-1238.
37. Saxton, K.E., and Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.

38. Schaap, M.G., Leij, F.J., and van Genuchten, M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847-855.
39. Schaap, M.G., Leij, F.J., and van Genuchten, M.Th. 2001. ROSETA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251: 163-176.
40. Schuh, W.M., Cline, R.L., and Sweney, M.D. 1988. Comparison of laboratory procedure and a textural model for predicting in situ soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1218-1227.
41. Sillers, W.S., Fredlund, D.G., and Zakerzadeh, N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotech. Geol. Eng.* 19: 243-283.
42. Tietje, O., and Tapkenhinrichs, M. 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1088-1095.
43. Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S., and Rawls, W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1085-1092.
44. Tóth, B., Makó, A., Guadagnini, A., and Tóth, G. 2012. Water retention of salt-affected soils: Quantitative estimation using soil survey information. *Arid Land Research and Management*, 26: 2. 103-121.
45. Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1990. Fractal process in soil water retention. *Water Resour. Res.* 26: 1047-1054.
46. Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distribution: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 362-369.
47. Ungaro, F., Calzolari, C., and Busano, E. 2005. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of north Italy: Water retention properties. *Geoderma*, 124: 293-317.
48. Vereecken, H., Dielst, J., van Orshoven, J., Feyen, J., and Bouma, J. 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1371-1378.
49. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., and van Genuchten, M.Th. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van genuchten-mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone J.* 9: 795-820.
50. Walczak, R.T., Moreno, F., Stawinski, C., Fernandez, E., and Arrue, J.L. 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *J. Hydrol.* 329: 527-533.
51. Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y., and Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251: 123-150.
52. Wu, L., Vomocil, J.A., and Childs, S.W. 1990. Pore size, particle size, aggregate size, and water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 952-956.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(4), 2013*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **The effect of parameters of particle and aggregate size distribution on the point estimation of soil water retention curve**

**\*H. Bayat<sup>1</sup>, Sh. Javanshir<sup>2</sup>, N. Davatgar<sup>3</sup> and M.R. Neyshabouri<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran,

<sup>2</sup>M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran,

<sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran,

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 05/19/2012; Accepted: 09/19/2012

### **Abstract**

Due to high variability and complexity of the soils, direct measurement of hydraulic parameters is difficult, time-consuming and expensive. Therefore, these properties are estimated using indirect methods. In this study, 74 soil samples were taken from Guilan province, and particle (PSD) and micro-aggregate size distribution (MASD), bulk density and water content at matric suctions of 2, 5, 33, 100 and 1500 kPa were measured. Fractal parameters of soil PSD and MASD and particle's size distribution parameters of Fredlund's model were calculated and used to estimate water content at different matric suctions. The results showed that entering fractal parameters of PSD did not improve the estimation of water content. By adding fractal parameters of MASD to the model, estimation of water contents at different matric suctions was improved significantly ( $P < 0.05$ ) and the root mean square error (RMSE) value decreased by 6.5% for the validation step. This may be the result of the influence of soil structure on water retention. But using of PSD parameters of Fredlund's model was more effective in estimation of water content and decreased the RMSE of validation step up to 27.0%. The best estimation of water content was observed at the matric suction of 5 kPa, in which the coefficient of determination of training step increased by 0.36. It may be due to the large number of parameters of Fredlund's model and better simulation of PSD. In general, using parameters of PSD and MASD improved the estimation of soil water retention curve.

**Keywords:** Micro-aggregate, Fredlund model, Particle size distribution, Pedotransfer functions

---

\* Corresponding Author; Email: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

