

تأثیر گروه‌های بافتی مختلف بر دقت مدل‌های متفاوت منحنی نگهداری آب خاک

مصطفی راستگو^۱ - حسین بیات^{۲*} - محرم منصوری‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

چکیده

مدل‌های بسیاری برای توصیف منحنی نگهداری آب خاک (SWRC) ارائه شده است، اما به ندرت توانایی برازش تعداد زیادی از آنها در خاک‌های مختلف و گروه‌های بافتی متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی قابلیت برازش ۱۰ مدل SWRC بر داده‌های تجربی و انتخاب بهترین مدل از بین آنها برای کل نمونه‌های خاک و برای هر کدام از گروه‌های بافتی می‌باشد. در این پژوهش ۱۴۵ نمونه خاک روئین و زیرین از استان‌های گیلان، همدان و کرمانشاه به صورت دست خورده و دست نخورده برداشت و بعد از تعیین بافت، به گروه‌های بافتی تفکیک شدند. مقدار رطوبت در ۱۲ پتانسیل ماتریک اندازه‌گیری شد. ۱۰ مدل SWRC بر داده‌های تجربی برازش و دقت آنها، با معیارهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل فردلانند و زینگ در کل نمونه‌های خاک و همچنین در گروه بافتی درشت، مدل لیباردی در گروه بافتی ریز و مدل پروتسارترت در گروه بافتی متوسط بالاترین دقت برازش را داشتند، اما این مدل‌ها، به لحاظ آماره ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد در کل نمونه‌های خاک و هر کدام از گروه‌های بافتی مختلف با هم نداشتند. اگر چه مدل‌های فرکتالی دارای پایه فیزیکی و ریاضی هستند، اما انعطاف‌پذیری لازم را برای توصیف منحنی SWRC ندارند. مدل‌های فرمی و تانی با توابع نمایی ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. سرانجام، مدل لیباردی به دلیل تعداد پارامترهای کمتر، مفهوم فیزیکی پارامترها و فرم ساده معادله آن به عنوان بهترین مدل معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: قابلیت برازش، گروه‌های بافتی، مدل، منحنی نگهداری آب خاک

مقدمه

اخیراً در تحقیقات مربوط به پوشش گیاهی و تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییرات آب و هوا، توزیع مکانی SWRC به عنوان یک مؤلفه مهم مطرح شده است (۱۸)؛ از طرفی، افزایش نگرانی عمومی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی و تخلیه زیر سطحی فاضلاب‌های مضر، موجب تحقیقات جدید بسیاری در رابطه با جریان در محیط‌های غیراشباع، برای کمک به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد مواد شیمیایی و همچنین افزایش عملکرد به منظور دستیابی به اهداف کشاورزی دقیق^۵، شده است (۱۱).

برای به دست آوردن SWRC روش‌های مستقیم آزمایشگاهی بسیار زمان‌بر (صفحات تحت فشار) و هزینه‌بر (تابش گاما) هستند، به همین دلیل از سال‌ها پیش پژوهندگان در پی دستیابی به روش‌های غیرمستقیم و کم‌هزینه برای پیش‌بینی آن بوده‌اند (۲). بدین منظور مدل‌های مختلفی از جمله مدل‌های تحلیلی برای SWRC توسط پژوهندگان مختلف ارائه شده است. مانیام و همکاران (۲۱) عملکرد دو

منحنی نگهداری آب خاک^۴ (SWRC) رابطه‌ی میزان رطوبت خاک با مکش ماتریک خاک را نشان می‌دهد. این ویژگی که بیانگر نگاه‌داشت آب در خاک است، نه تنها در پیش‌بینی تغییرات رطوبتی خاک و شیب پتانسیل هیدرولیکی در یک سیستم جریان به کار می‌رود، بلکه یک ورودی برای برخی از مدل‌های هدایت هیدرولیکی نیز به شمار می‌رود (۲۵). منحنی نگهداری آب خاک کاربردهای زیادی در زمینه کشاورزی (مانند تخمین مقدار آب قابل دسترس برای گیاه) و محیط زیست (مانند مدل‌سازی جریان آب در منطقه غیراشباع) دارد.

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه خاک‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* نویسنده مسئول: (Email: h.bayat@basu.ac.ir)

۳- استادیار گروه کامپیوتر، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

DOI: 10.22067/jsw.v33i1.74326

4- Soil water retention curve

5- Precision agriculture or precision farming

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تجزیه خاک‌ها

برای انجام این پژوهش تعداد ۱۴۵ نمونه، که شامل ۴۰ نمونه از استان کرمانشاه (E ۴۸° ۰۱' - ۴۵° ۲۰'، N ۳۷° ۳۳' - ۳۵° ۱۷')، ۴۵ نمونه از استان همدان (E ۴۹° ۳۶' - ۴۷° ۳۴'، N ۳۵° ۴۸' - ۳۳° ۲۷') و ۶۰ نمونه از استان گیلان (E ۳۴° ۳۴' - ۵۰° ۵۳'، N ۴۸° ۲۷' - ۳۸° ۳۴') است، جمع‌آوری گردید. برای افزایش تنوع نمونه‌های خاک، نمونه‌برداری از مرکز دو لایه سطحی (عمق ۳۵-۱۰ سانتی‌متری) و زیرسطحی (عمق ۴۵-۲۰ سانتی‌متری) از سری‌های مشخص خاک‌ها صورت گرفت. به دلیل آن که نمونه‌برداری از استان‌های مختلف انجام شده است، لایه‌های سطحی و زیرسطحی خاک در مکان‌های مختلف دارای عمق و ضخامت متفاوت بودند. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. برای تعیین بافت خاک نمونه‌ها به روش هیدرومتر (۱۵)، خاک را هوا خشک کرده و سپس از الک ۲ mm گذرانده شد. برای تعیین SWRC، رطوبت نمونه‌های خاک که از مرکز هر لایه و به وسیله‌ی سیلندر نمونه‌برداری به ترتیب با ارتفاع و قطر ۴/۵ و ۵/۱ سانتی‌متر گرفته شده بود، در مکش‌های صفر، ۱، ۲، ۴، ۶ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه جعبه شن^۱ و در مکش‌های ۱۰، ۳۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری^۲ (۹) اندازه‌گیری شد. همچنین تا مکش ۱۰۰ کیلو پاسکال از نمونه‌های دست نخورده و برای مکش‌های بالاتر از نمونه‌های دست خورده استفاده گردید. ۱۰ مدل SWRC بر داده‌های آزمایشگاهی هر نمونه خاک برآزش داده شد. گروه‌بندی داده‌ها به این صورت انجام شد که کل نمونه‌ها که شامل ۹ کلاس بافتی بودند، به سه گروه بافتی ریز (شامل کلاس‌های بافتی رسی، رسی سیلتی، لوم رسی، لوم رسی شنی و لوم رسی سیلتی)، گروه بافتی متوسط (شامل کلاس‌های بافتی لوم سیلتی و لوم) و درشت (شامل کلاس‌های بافتی شن لومی و لوم شنی) بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA تقسیم شدند. ارزیابی دقت مدل‌ها یک بار برای کل نمونه‌ها و بار دیگر برای گروه‌های بافتی انجام شد.

مدل‌های منحنی نگهداری آب خاک

ده مدل SWRC بر داده‌های آزمایشگاهی هر نمونه خاک برآزش داده شد. روابط و پارامترهای این مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

منحنی رطوبتی ون‌گونختن و کمپل را در خاک‌های شنی نیجریه با هم مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که دقت مدل کمپل از مدل ون‌گونختن برای نمونه‌های خاک با درصد شن بالاتر، بیشتر بود. بیات و همکاران (۳)، ۱۳ مدل معروف و پرکاربرد منحنی مشخصه رطوبتی خاک را بر داده‌های تجربی خاک‌های استان گیلان برآزش دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل بروکس و کوری ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌ها داشت. آسولین و همکاران (۲) در پژوهش‌های خود دریافتند که عملکرد مدل ون‌گونختن به ویژه در منطقه نزدیک اشباع از مدل بروکس و کوری بهتر است.

نبی زاده و بیگی هرچگانی (۲۶)، ۷ مدل SWRC (ون‌گونختن، کمپل، بروکس و کوری، سایمونز، لیباردی، فارل و لارسون، و بروس و لاکسمور) را بر داده‌های تجربی خاک‌های استان چهارمحال بختیاری برآزش دادند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که در همه نمونه‌ها و در همه کلاس‌های بافتی، مدل ون‌گونختن و مدل بروکس و کوری به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌ها از خود نشان دادند. همچنین دقت برآزش مدل‌های سایمونز، ون‌گونختن و لیباردی بسیار نزدیک و شبیه به یکدیگر بود.

فولادمند و گلکار (۱۲) ۱۰ مدل SWRC را بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده SWRC در ۳۰ نمونه خاک مناطق مختلف استان فارس با تنوع بافتی مناسب برآزش دادند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که مدل دکستر در سه گروه بافتی ریز، متوسط و درشت، بالاترین دقت برآزش را داشت. در پژوهشی دادمهر و همکاران (۸) قابلیت برآزش مدل‌های راولز، کمپل، ساکستون و هاتسون و کاس را با هم مقایسه کردند. نتایج ارزیابی آن‌ها نشان داد که مدل هاتسون در برآورد SWRC موفق‌تر عمل می‌کند. کرنلیز و همکاران (۷)، با بررسی ۱۰ مدل تک‌نمایی SWRC گزارش کردند که مدل ون‌گونختن و کازوگی بهترین قابلیت برآزش را در مقدار رطوبت‌های زیاد و متوسط داشتند.

در بسیاری از مطالعات برای پیش‌بینی SWRC در خاک از مدل ون‌گونختن و بروکس و کوری استفاده می‌شود (۱۷)، بدون آنکه کارایی آن‌ها نسبت به دیگر مدل‌ها مقایسه شود. از سوی دیگر مدل‌های فیزیکی بسیاری برای توصیف SWRC و برآزش بر داده‌های تجربی آن ارائه شده، اما به ندرت قابلیت برآزش تعداد زیادی از آن‌ها در خاک‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به همین علت کاربران هنگام استفاده از مدل‌های SWRC اطلاعات اندکی در مورد انتخاب مدل مناسب برای خاک‌های مختلف دارند. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی قابلیت برآزش ۱۰ مدل SWRC بر داده‌های تجربی منحنی مشخصه رطوبتی خاک و انتخاب بهترین مدل برای کل نمونه‌های خاک و برای هر کدام از گروه‌های بافتی ریز، متوسط و درشت خاک بود.

1- Sand box

2- Pressure plate

جدول ۱- مدل‌های منحنی نگهداری آب استفاده شده در این مطالعه
Table 1- Water retention curve models used in this study

نام Name*	مدل Model	پارامترها Parameters
گاردنر (۱۹۵۶) Gardner (1956)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + a\psi^n} \right)$	θ_r, θ_s, a, n
بروتسائرت (۱۹۶۶) Brutsaert (1966)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n} \right)$	θ_r, θ_s, a, n
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹) Libardi et al. (1979)	$\theta = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{h}{a} + 1 \right) + \theta_s$	θ_s, a, b
ون گنوختن-بوردین (۱۹۵۳) van Genuchten-Burdine (1953)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m}$ $m = 1 - \frac{2}{n}$	θ_r, θ_s, a, n
ون گنوختن-معلم (۱۹۷۶) van Genuchten-Mualem (1976)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{(1 + (a\psi)^n)^m} \right)$ $m = 1 - \frac{1}{n}$	θ_r, θ_s, a, n
تانی (۱۹۸۲) Tani (1982)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{c - \psi}{c - n} \right) \exp \left(-\frac{c - \psi}{c - n} \right)$	θ_r, θ_s, c, n
فرمی (مکی و بامب، ۱۹۸۷) Fermi (McKee and Bumb, 1987)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + \exp \left(\frac{\psi - a}{n} \right)} \right]$	θ_r, θ_s, a, n
فردلاند و زینگ (۱۹۹۴) Fredlund and Xing (1994)	$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\Psi_r} \right)} \right] \frac{1}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \right]^m}$	$\theta_s, a, n, m, \Psi_r$
دی‌گینز (۱۹۸۵) De Gennes (1985)	$\theta = \Phi \left(\frac{\psi}{f} \right)^{D-3}$	$\Phi, D,$
ژیو و دانگ (۲۰۰۴) Xu and Dong (2004)	$\theta = \theta_s + \theta_r - \theta_s \left(\frac{\psi}{f} \right)^{D-3}$	θ_r, θ_s, f, D

* در تمامی مدل‌ها θ رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) یا θ_s یا θ_0 رطوبت حجمی اشباع در مکش صفر ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_r رطوبت حجمی باقیمانده در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و ψ مکش خاک (سانتی‌متر) را نشان می‌دهد. a مرتبط با مکش در نقطه عطف منحنی بوده و دارای رابطه با مکش ورود هوا است، که این پارامتر دارای مفهوم فیزیکی می‌باشد. پارامتر n مربوط به سرعت غیراشباع شدن یا شیب ناحیه غیراشباع است که در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشد. m پارامتر تقارن^۱ منحنی حول نقطه عطف است. بطور کلی هر دو پارامتر n و m بر شیب منحنی تأثیر می‌گذارند. در مدل گاردنر پارامتر a در ارتباط با مکش ورود هوا به خاک و واحد آن عکس واحد مکش است. در مدل فرمی پارامتر a دارای واحد مکش خاک و مربوط به مکش ورود هوای خاک است. در مدل فردلاند و زینگ پارامتری است که در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک بوده و m عدم تقارن مدل را نشان می‌دهد. واحد پارامتر a در مدل فردلاند و زینگ مشابه مکش است، اما مقدار آن از مکش ورود هوا به خاک بزرگتر است. Ψ_r مکش خاک در رطوبت باقیمانده است. در مدل دی‌گنز Φ تخلخل کل ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و D ، بعد فرکتالی می‌باشد. در مدل ژيو و دانگ f پتانسیل ورود هوا به خاک می‌باشد.

نتایج و بحث

در شکل ۱ توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده برای منحنی نگهداری آب خاک در مثلث بافت خاک نمایش داده شده است، که ۹ کلاس از دوازده کلاس بافتی را پوشش دادند. در جدول ۲ آماره‌های توصیفی اجزای رس، سیلت و شن برای کل نمونه‌های خاک و گروه‌های بافتی آورده شده است. بر اساس جدول ۲ و شکل ۱، اجزای بافتی دارای دامنه وسیعی بودند.

مقایسه کارایی مدل‌های SWRC برای کل نمونه‌های خاک

مقایسه میانگین آماره‌های ارزیابی دقت مدل‌ها در برازش بر داده‌های تجربی SWRC برای کل نمونه‌های خاک در جدول ۳ نشان داده شده است. مدل‌ها به ترتیب کمتر بودن $RMSE$ مرتب شده‌اند. چون ضریب تعیین نمی‌تواند تعیین کند که آیا مدل برازش شده اریب دارد یا خیر؟ به همین دلیل باید نمودارهای باقیمانده را ارزیابی نمود. این در حالی است که $RMSE$ نشان‌دهنده خطای تصادفی و اریب است. بنابراین، معیار $RMSE$ نسبت به R^2 قابل اعتمادتر است و همچنین مقادیر کم R^2 لزوماً افزایش خطا در مدل را نشان نمی‌دهند (۱۹). از طرف دیگر R^2 معیار مناسبی برای تبیین میزان تأثیر مشاهدات بر متغیر وابسته نیست، زیرا با افزایش مشاهدات و همچنین با افزایش متغیرهای مستقل میزان R^2 افزایش می‌یابد و این افزایش ممکن است کاذب باشد. حال آن که معیار $RMSE$ که بر مبنای مجموع مربعات خطا می‌باشد، تابعی از میانگین خطا، توزیعی از مقادیر خطا و جذر تعداد مشاهدات هر نمونه می‌باشد و به نظر می‌رسد معیار مناسب‌تری برای ارزیابی عملکرد مدل و داده‌های اندازه‌گیری باشد (۱۶). به همین دلیل در پژوهش حاضر مبنای تفسیر نتایج، بیشتر معیار $RMSE$ می‌باشد. همچنین یکی دیگر از علت‌های انتخاب معیار ارزیابی $RMSE$ نسبت به معیار ارزیابی R^2 ، توانایی آن در نشان دادن تفاوت بین دقت مدل‌ها می‌باشد. برای مثال در گروه خاک‌های متوسط بافت، با معیار R^2 اختلاف معنی‌داری بین مدل‌ها تا حرف c و با معیار $RMSE$ این اختلاف تا حرف f توسط آزمون مقایسه چند دامنه‌ای دانکن تعیین گردید. میرزائی و قربانی دشتکی (۲۴) نیز در پژوهش خود به بررسی و مقایسه کارایی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های منحنی نگه‌داشت رطوبتی خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف بین مقادیر متوسط آماره ارزیابی R^2 در بین مدل‌های مختلف در هیچ کدام از کلاس‌های بافتی معنی‌دار نبود. در صورتی که بر اساس آماره $RMSE$ اختلاف معنی‌داری بین مدل‌های استفاده شده در بافت‌های رسی و رس سیلتی وجود داشت. اما علت استفاده از آماره R^2 در زمینه ارزیابی عملکرد دقت برازش مدل‌ها، فراهم نمودن امکان مقایسه نتایج با دیگر تحقیقات چاپ شده است.

برازش مدل‌ها با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی تکرارپذیر^۱ توسط نرم‌افزار MATLAB، برای یافتن مقدار پارامترها به گونه‌ای که بهترین برازش بین مدل‌های SWRC و داده‌های تجربی به دست آید، انجام شد. بر اساس روش میلان و همکاران (۲۳)، مقایسه مدل‌ها از طریق مقایسه میانگین بین آماره‌های ارزیابی دقت مدل‌ها انجام شد که بدین منظور از نرم‌افزار SAS 9.1 با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

مقایسه دقت مدل‌ها

دقت برازش مدل‌ها به داده‌ها، با سه معیار ضریب تعیین (R^2) ، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ و معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده $(AICc)$ (۶) مورد ارزیابی قرار گرفت.

معیار آکایک اصلاح شده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$AICc = N \times \ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + 2P + \frac{2P(P+1)}{N-P-1} \quad (1)$$

که در آن SSE مجموع مربعات خطا، N تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر خاک و P ، تعداد ضرایب مدل SWRC است. مجموع مربعات خطا به صورت زیر تعیین شد:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_p)^2 \quad (2)$$

که در آن Y_i و Y_p به ترتیب رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشند.

ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_p)^2}{N}} \quad (3)$$

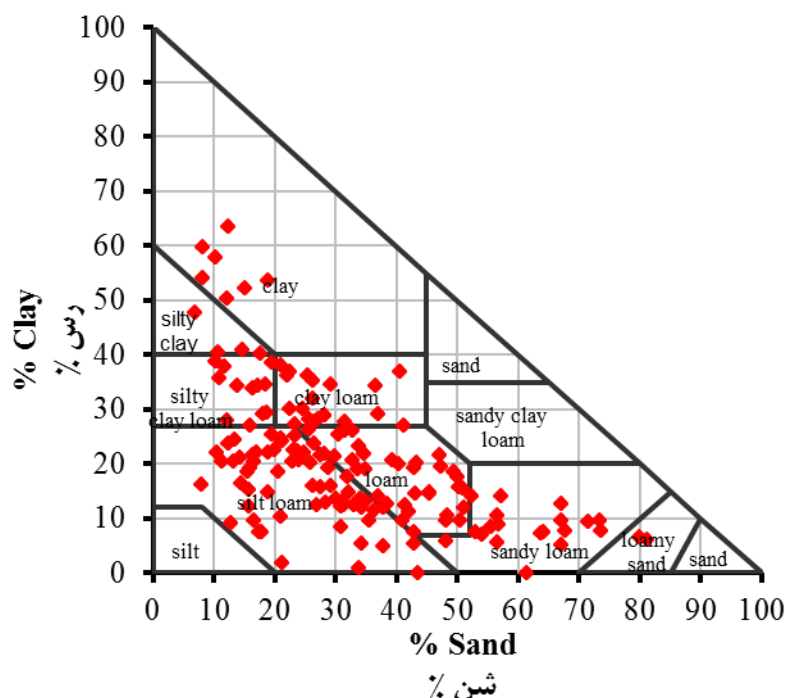
ضریب تعیین (R^2) :

$$R^2 = \left\{ \frac{\left[N \left(\sum_{i=1}^N Y_i Y_p \right) - \sum_{i=1}^N Y_i \sum_{i=1}^N Y_p \right]^2}{\left[\sqrt{N \left(\sum_{i=1}^N Y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right)^2} \times \sqrt{N \left(\sum_{i=1}^N Y_p^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N Y_p \right)^2} \right]} \right\} \quad (4)$$

Y_i و Y_p همان معانی قبلی را دارند.

آماره $RMSE$ ، ترکیبی از هر دو اثر اریب و صحت است. هر مدلی که دارای کمترین $RMSE$ باشد در مقایسه با دیگر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. در معیار اطلاعات آکایک، مدلی که دارای کوچک‌ترین مقدار $AICc$ باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب خواهد شد.

- 1- Iterative nonlinear regression
- 2- Coefficient of determination
- 3- Root mean square error
- 4- Corrected Akaike's information criterion



شکل ۱- توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده در مثلث بافت خاک

Figure 1- Textural distribution of the soil samples in the soil textural triangle

جدول ۲- ویژگی‌های آماری اجزای بافتی برای کل نمونه‌های خاک و گروه‌های بافتی مختلف

کل نمونه‌های خاک All soil samples (n=145)					گروه ریز Fine-group (n=34)			
	Mean	SD*	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
رس Clay (%)	20.8	12.3	0.0	63.4	38.5	9.7	26.9	63.4
سیلت Silt (%)	47.2	13.4	12.7	78.1	40.9	8.2	22.5	57.0
شن Sand (%)	32.8	16.5	6.9	81.2	20.5	9.2	6.9	41.2
گروه متوسط Moderate-group (n=89)					گروه درشت Coarse-group (n=22)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
رس Clay (%)	16.9	6.6	0.0	29.4	8.1	3.2	0.0	14.1
سیلت Silt (%)	53.2	10.9	31.1	78.1	28.3	9.9	12.7	51.6
شن Sand (%)	29.8	11.5	7.9	53.0	63.5	9.7	42.9	81.2

* SD، انحراف استاندارد؛ Min، حداقل؛ Max، حداکثر؛ n، تعداد نمونه‌های خاک

* SD, standard deviation; Min, minimum; Max, maximum; n, the number of soil samples

معلم و پروتسائرت نداشت. سیلرز و همکاران (۲۸) بیان داشتند که مدل‌های فردلاند و زینگ، ون گنوختن - معلم و پروتسائرت می‌توانند

نتایج *RMSE* در جدول ۳ نشان داد که مدل فردلاند و زینگ تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد با مدل‌های لیباردی، ون گنوختن -

۹۵ درصد) با هم نداشتند. یکی از مزیت‌های مدل ون گنوختن-بوردین عدم همپوشانی پارامترهای آن می‌باشد، به طوری که تأثیر یک پارامتر مستقل از تأثیر پارامترهای دیگر است، که این امر موجب برازش بهتر این مدل بر داده‌ها می‌شود و در این پژوهش نیز از دقت بالایی برخوردار بود.

مدل فرمی از نظر آماره ارزیابی آماره‌های $RMSE$ و $AICc$ دقت بسیار ضعیفی (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) نسبت به همه مدل‌ها داشت. چون پارامترهای معادله فرمی، همزمان بر شکل و موقعیت منحنی اثر دارند، باعث افزایش نقاط حداقل موضعی در هنگام برازش منحنی می‌شوند و نمی‌توان اثر دو پارامتر را از هم تفکیک کرد، این موضوع باعث سختی برازش می‌شود (۲۸). از دلایل عدم برتری مدل‌های فرکتال همچون مدل دی‌گینز نسبت به مدل‌های دیگر می‌توان عدم نمایش یک شکل سیگموئیدی و پیوسته‌ای از منحنی $SWRC$ به علت شکل معادله را که حاصل توان آن کمتر از یک می‌شود ($3-D$)، دانست.

یک تابع ریاضی پیوسته‌ای را برای کل دامنه $SWRC$ برآورد کنند و همچنین پارامترهای این مدل‌ها دارای مفهوم فیزیکی هستند، که باعث افزایش دقت مدل‌ها در برازش بر داده‌ها می‌شوند. به عنوان مثال پارامتر m در مدل فردلاند و زینگ مرتبط با تقارن منحنی می‌باشد و مقادیر کوچک آن شیب منحنی نگهداری آب را در مکش‌های زیاد تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر پارامترهای این مدل‌ها دارای وظیفه خاصی بوده و تعریف مشخص در برازش دارند. احتمالاً به همین علت این مدل‌ها دارای برازش دقیق در این پژوهش بودند. این نتایج با نتایج بیات و همکاران (۳) که بیان داشتند مدل فردلاند و زینگ دارای دقت بالایی در برازش بود، مطابقت دارد. البته در بین مدل‌های ذکر شده، به لحاظ آماره $AICc$ ، مدل فردلاند و زینگ به دلیل تعداد پارامترهای بیشتر خود دقت برازش پایین‌تری (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) نسبت به مدل‌های لیباردی، ون گنوختن-معلم و پروتسائرت داشت.

بعد از مدل‌های ذکر شده، مدل‌های ون گنوختن-بوردین و گاردنر از نظر آماره‌های $RMSE$ ، $AICc$ و R^2 تفاوت معنی‌داری (در سطح

جدول ۳- دقت برازش مدل‌های منحنی نگهداری آب خاک برای کل نمونه‌های خاک

Table 3- The fitting accuracy of water retention curve models for all soil samples

مدل Model	معادله Equation	$RMSE$ ($cm^3 cm^{-3}$)		$AICc$		R^2	
		میانگین Mean*	SD	میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD
فردلاند و زینگ (۱۹۹۴) Fredlund and Xing (1994)	Power law	0.020a	0.010	-78.5c	11.2	0.979a	0.033
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹) Libardi et al. (1979)	Logarithm	0.021ab	0.010	-86.1a	11.0	0.973ab	0.037
ون گنوختن-معلم (۱۹۷۶) van Genuchten-Mualem (1976)	Power law	0.022ab	0.010	-81.7b	11.1	0.968ab	0.050
پروتسائرت (۱۹۶۶) Brutsaert (1966)	Power law	0.022ab	0.017	-82.7b	12.5	0.956b	0.143
ون گنوختن-بوردین (۱۹۵۳) van Genuchten-Burdine (1953)	Power law	0.025bc	0.014	-78.7c	11.4	0.964ab	0.065
گاردنر (۱۹۵۶) Gardner (1956)	Power law	0.027c	0.013	-76.9c	12.1	0.965ab	0.036
ژیو و دانگ (۲۰۰۴) Xu and Dong (2004)	Fractal	0.036d	0.016	-69.7d	12.0	0.938c	0.043
تانی (۱۹۸۲) Tani (1982)	Exponential	0.044e	0.011	-66.4e	5.9	0.895d	0.043
دی‌گینز (۱۹۸۵) De Gennes (1985)	Fractal	0.046e	0.020	-67.3de	10.9	0.886de	0.061
فرمی (مکی و بامب، ۱۹۸۷) Fermi (McKee and Bumb, 1987)	Exponential	0.051f	0.017	-60.2f	7.6	0.872e	0.084

*- حروف کوچک انگلیسی در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) بین مدل‌ها مطابق آزمون دانکن می‌باشد. R^2 ، ضریب تعیین؛ $RMSE$ ، ریشه میانگین مربعات خطا؛ $AICc$ ، معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده و SD ، انحراف استاندارد می‌باشد.

* Similar letters in each column indicate no significant difference between models at $P < 0.05$ according to Duncan's test. $RMSE$, root mean square error; R^2 , coefficient of determination; $AICc$, corrected Akaike's information criterion and SD , standard deviation.

گروه خاک‌های ریز بافت

بهبود می‌یابد. با این حال همیشه این نکته صادق نیست. بنابراین همیشه افزایش تعداد پارامترها دلیل بر برتری مدل نمی‌باشد، زیرا در اغلب موارد سهولت برازش و استفاده از مدل کاهش می‌یابد. مدل‌های فرمی و تانی ضعیف‌ترین (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) دقت برازش را نسبت به سایر مدل‌ها از نظر آماره‌های ارزیابی $RMSE$ و R^2 (به غیر از مدل دی‌گینز) داشتند. همچنین از نظر آماره ارزیابی $AICc$ ، مدل فرمی ضعیف‌ترین (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) دقت برازش را نسبت به سایر مدل‌ها (به غیر از مدل تانی) داشت. مدل‌های فرمی و تانی دارای تابع نمایی هستند و عباسی (۱) بیان داشت که تابع نمایی به خوبی قادر به برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک که دارای شکل سیگموئیدی می‌باشد، نیست. این نتیجه با نتایج این گروه بافتی مطابقت دارد. همچنین سیلرز و همکاران (۲۸) بیان داشتند که مدل تانی غیر قابل انعطاف بوده و برازش این معادله بر داده‌ها مشکل است. احتمالاً به همین علت در این پژوهش دقت برازش بالایی نداشت.

جدول ۴ مقایسه دقت مدل‌ها برای توصیف SWRC را در گروه خاک‌های ریز بافت نشان می‌دهد. نتایج $RMSE$ در جدول ۴ نشان داد که مدل لیباردی تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد با مدل‌های فردلاند و زینگ، ون‌گنوختن-معلم، گاردنر، بروتسائرت و ون-گنوختن-بوردین نداشت. مدل لیباردی و گاردنر می‌توانند یک تابع ریاضی پیوسته‌ای برای کل دامنه SWRC به واسطه پارامترهای فیزیکی خود، برآورد کنند و همانطور که از نتایج این پژوهش مشخص می‌باشد، دقت برازش بالایی داشتند. این نتایج با یافته‌های پتیل و همکاران (۲۷) که نتایج خوبی از دقت برازش مدل لیباردی گزارش کردند، مطابقت دارد. همچنین از نظر آماره $AICc$ مدل لیباردی با سه پارامتر تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد با مدل‌های ون‌گنوختن-معلم و بروتسائرت نداشت و دقت برازش بالاتری نسبت به مدل فردلاند و زینگ با پنج پارامتر داشت. در اغلب موارد هنگامی که تعداد پارامترهای برازشی مدل افزایش می‌یابد عملکرد مدل نیز

جدول ۴- نتایج دقت برازش مدل‌های منحنی نگهداری آب خاک برای گروه خاک‌های ریز بافت
Table 4- The fitting accuracy of water retention curve models for fine-textured soils group

مدل Model	معادله Equation	$RMSE$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		$AICc$		R^2	
		میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹) Libardi et al. (1979)	Logarithm	0.021a	0.010	-86.0a	11.7	0.965a	0.041
فردلاند و زینگ (۱۹۹۴) Fredlund and Xing (1994)	Power law	0.022a	0.011	-77.7b	12.6	0.971a	0.037
ون‌گنوختن-معلم (۱۹۷۶) van Genuchten-Mualem (1976)	Power law	0.022a	0.011	-81.3ab	12.5	0.960a	0.060
گاردنر (۱۹۵۶) Gardner (1956)	Power law	0.025a	0.013	-78.7b	13.0	0.961a	0.039
بروتسائرت (۱۹۶۶) Brutsaert (1966)	Power law	0.025a	0.023	-80.8ab	14.8	0.924ab	0.198
ون‌گنوختن-بوردین (۱۹۵۳) van Genuchten-Burdine (1953)	Power law	0.029ab	0.019	-76.0bc	14.3	0.932ab	0.120
ژبو و دانگ (۲۰۰۴) Xu and Dong (2004)	Fractal	0.035bc	0.017	-70.9cd	12.6	0.930ab	0.049
دی‌گینز (۱۹۸۵) De Gennes (1985)	Fractal	0.042cd	0.020	-69.4d	10.8	0.886bc	0.061
تانی (۱۹۸۲) Tani (1982)	Exponential	0.045d	0.011	-66.1de	5.7	0.873c	0.052
فرمی (مکی و بامب، ۱۹۸۷) Fermi (McKee and Bumb, 1987)	Exponential	0.049d	0.014	-60.8e	6.5	0.859c	0.088

*- حروف کوچک انگلیسی در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) بین مدل‌ها مطابق آزمون دانکن می‌باشد. R^2 ، ضریب تعیین؛ $RMSE$ ، ریشه میانگین مربعات خطا؛ $AICc$ معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده و SD ، انحراف استاندارد می‌باشد.

* Similar letters in each column indicate no significant difference between models at $P < 0.05$ according to Duncan's test. $RMSE$, root mean square error; R^2 , coefficient of determination; $AICc$, corrected Akaike's information criterion and SD , standard deviation.

جدول ۵- نتایج دقت برازش مدل‌های منحنی نگهداری آب خاک برای گروه خاک‌های متوسط بافت

Table 5- The fitting accuracy of water retention curve models for moderate-textured soils group

مدل Model	معادله Equation	$RMSE (cm^3 cm^{-3})$		$AICc$		R^2	
		میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD
بروتسائرت (۱۹۶۶) Brutsaert (1966)	Power law	0.019a	0.008	-84.7ab	9.7	0.983a	0.021
فردلانند و زینگ (۱۹۹۴) Fredlund and Xing (1994)	Power law	0.019ab	0.009	-79.5c	10.1	0.982a	0.034
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹) Libardi et al. (1979)	Logarithm	0.019ab	0.008	-87.4a	9.5	0.979a	0.037
ون گنوختن-معلم (۱۹۷۶) van Genuchten-Mualem (1976)	Power law	0.020ab	0.008	-83.7b	9.7	0.978a	0.034
ون گنوختن-بوردین (۱۹۵۳) van Genuchten-Burdine (1953)	Power law	0.023bc	0.010	-79.4c	9.1	0.973a	0.030
گاردنر (۱۹۵۶) Gardner (1956)	Power law	0.026c	0.011	-77.5c	11.2	0.970a	0.035
ژیو و دانگ (۲۰۰۴) Xu and Dong (2004)	Fractal	0.036d	0.015	-69.6d	11.2	0.942b	0.041
تانی (۱۹۸۲) Tani (1982)	Exponential	0.045e	0.010	-65.9e	5.5	0.898c	0.038
دی گینز (۱۹۸۵) De Gennes (1985)	Fractal	0.045e	0.018	-67.1de	9.8	0.891c	0.057
فرمی (مکی و بامب، ۱۹۸۷) Fermi (McKee and Bumb, 1987)	Exponential	0.050f	0.014	-60.5f	7.2	0.885c	0.078

*- حروف کوچک انگلیسی در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) بین مدل‌ها مطابق آزمون دانکن می‌باشد. R^2 ، ضریب تعیین؛ $RMSE$ ، ریشه میانگین مربعات خطا؛ $AICc$ ، معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده و SD ، انحراف استاندارد می‌باشد.

* Similar letters in each column indicate no significant difference between models at $P < 0.05$ according to Duncan's test. $RMSE$, root mean square error; R^2 , coefficient of determination; $AICc$, corrected Akaike's information criterion and SD , standard deviation.

گروه خاک‌های متوسط بافت

جدول ۵ مقایسه دقت مدل‌ها برای توصیف SWRC را در گروه خاک‌های متوسط بافت نشان می‌دهد. نتایج $RMSE$ در جدول ۵ نشان داد که مدل بروتسائرت بالاترین دقت برازش را داشت و به جز مدل‌های فردلانند و زینگ، لیباردی و ون گنوختن-معلم تفاوت آن با سایر مدل‌ها معنی‌دار (در سطح ۹۵ درصد) بود. همچنین بررسی عملکرد دقت برازش فرض‌های ون گنوختن شامل مدل‌های ون-گنوختن-بوردین و ون گنوختن-معلم نشان داد که این دو مدل تفاوت معنی‌داری از نظر آماره‌های $RMSE$ و R^2 با هم نداشتند. سیلرز و همکاران (۲۸) بیان داشتند که مدل‌های ون گنوختن-بوردین و ون-گنوختن-معلم در دامنه مکش‌های مختلف دارای انعطاف‌پذیری بالایی می‌باشند. بنابراین این نکته می‌تواند از عوامل مؤثر بر برتری این مدل‌ها باشد. به لحاظ آماره $AICc$ ، مدل لیباردی به دلیل تعداد پارامترهای کمتر خود (سه پارامتر) دقت برازش بالاتری (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) نسبت به سایر مدل‌ها (به غیر از بروتسائرت) داشت. به عنوان مثال با توجه به نتایج جدول ۵، مدل لیباردی با سه پارامتر

دقت برازش بالاتری نسبت به مدل‌های فردلانند و زینگ و دی گینز به ترتیب با ۵ و ۳ پارامتر از نظر آماره $AICc$ داشت. بنابراین تعداد پارامترهای یک مدل تنها و مؤثرترین فاکتور در تعیین دقت یک مدل نیست. مدل فرمی از نظر آماره‌های ارزیابی $RMSE$ و $AICc$ دقت بسیار ضعیفی (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) نسبت به همه مدل‌ها داشت.

گروه خاک‌های درشت بافت

جدول ۶ مقایسه دقت مدل‌ها برای توصیف SWRC را در گروه خاک‌های درشت بافت نشان می‌دهد. نتایج این گروه بافتی نشان داد که مدل فردلانند و زینگ از نظر آماره $RMSE$ بالاترین دقت برازش را داشت و با مدل‌های ون گنوختن-بوردین، لیباردی، ون گنوختن-معلم، بروتسائرت و گاردنر تفاوت معنی‌دار (در سطح ۹۵ درصد) نداشت. نتایج در این گروه بافتی نشان داد که مدل لیباردی از نظر آماره $AICc$ بالاترین دقت برازش را داشت و به جز مدل‌های فردلانند و زینگ، ون گنوختن-بوردین، ون گنوختن-معلم و بروتسائرت تفاوت

دقت برازشی تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، مدل لیباردی به دلیل تعداد پارامترهای کمتر (۳ پارامتر)، مفهوم فیزیکی پارامترها و فرم ساده‌ی معادله آن به عنوان بهترین مدل معرفی می‌شود. همچنین مدل‌های فرکتال و فرمی ضعیف‌ترین دقت برازش را داشتند.

شکل ۲ نمایش مقایسه دقت برازش مدل‌ها را برای هر سه گروه بافتی نشان می‌دهد. منحنی نگهداری آب یک خاک به سه ناحیه قابل تفکیک است. ناحیه اول منحنی، ناحیه ورود هوا نام دارد که در آن تغییرات رطوبت با افزایش مکش، اندک است. ناحیه دوم مویبندی می‌باشد که بیشترین آب‌دهی یا آب‌گیری در این ناحیه صورت می‌پذیرد و در نهایت ناحیه سوم اشباع باقی‌مانده، که در آن آب با نیروی زیادی به ذرات خاک چسبیده است. با توجه به شکل ۲، مدل‌های فردلاند وزینگ، لیباردی، بروتسائرت و ون‌گنوختن-بوردین توانستند به خوبی منحنی نگهداری آب خاک را در هر سه ناحیه شامل ناحیه-های ورود هوا، مویبندی و اشباع باقی‌مانده به خوبی شبیه‌سازی کنند و در بین مدل‌های ذکر شده، تنها مدل ون‌گنوختن-بوردین توانست منطقه شکست ناحیه ورود هوا را برای گروه درشت بافت به خوبی نشان دهد.

آن با سایر مدل‌ها معنی‌دار (در سطح ۹۵ درصد) بود. مدل‌های فرمی و دی‌گینز همچون گروه‌های بافتی قبل از نظر آماره ارزیابی $RMSE$ دقت بسیار ضعیفی (معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد) نسبت به همه مدل‌ها داشتند.

توجه به ترتیب مدل‌ها از نظر دقت در گروه‌های بافتی مختلف و کل داده‌ها نشان می‌دهد که قابلیت مدل‌ها در برازش بر داده‌های هر گروه بافتی متفاوت است. بدین صورت که مدل فردلاند و وزینگ در کل نمونه‌های خاک و همچنین در گروه بافتی درشت، مدل لیباردی در گروه بافتی ریز و مدل بروتسائرت در گروه بافتی متوسط بالاترین دقت برازش را داشتند. اگر بخواهیم ارزیابی از برهم‌کنش بین مدل‌ها و گروه‌های بافتی خاک و همچنین کل نمونه‌های خاک داشته باشیم، مشخص است که مدل‌های فردلاند و وزینگ، بروتسائرت، لیباردی، ون‌گنوختن-بوردین و ون‌گنوختن-معلم دارای دقت برازش خوب در تمام کلاس‌ها می‌باشند. در مقابل در هر سه گروه بافتی و کل نمونه‌های خاک دقت خوبی از مدل‌های فرمی و تانی و همچنین مدل‌های فرکتالی مشاهده نشد. با توجه به این که در بین مدل‌های برتر گروه اول در کل نمونه‌ها و برای هر کدام از گروه‌های بافتی که از نظر

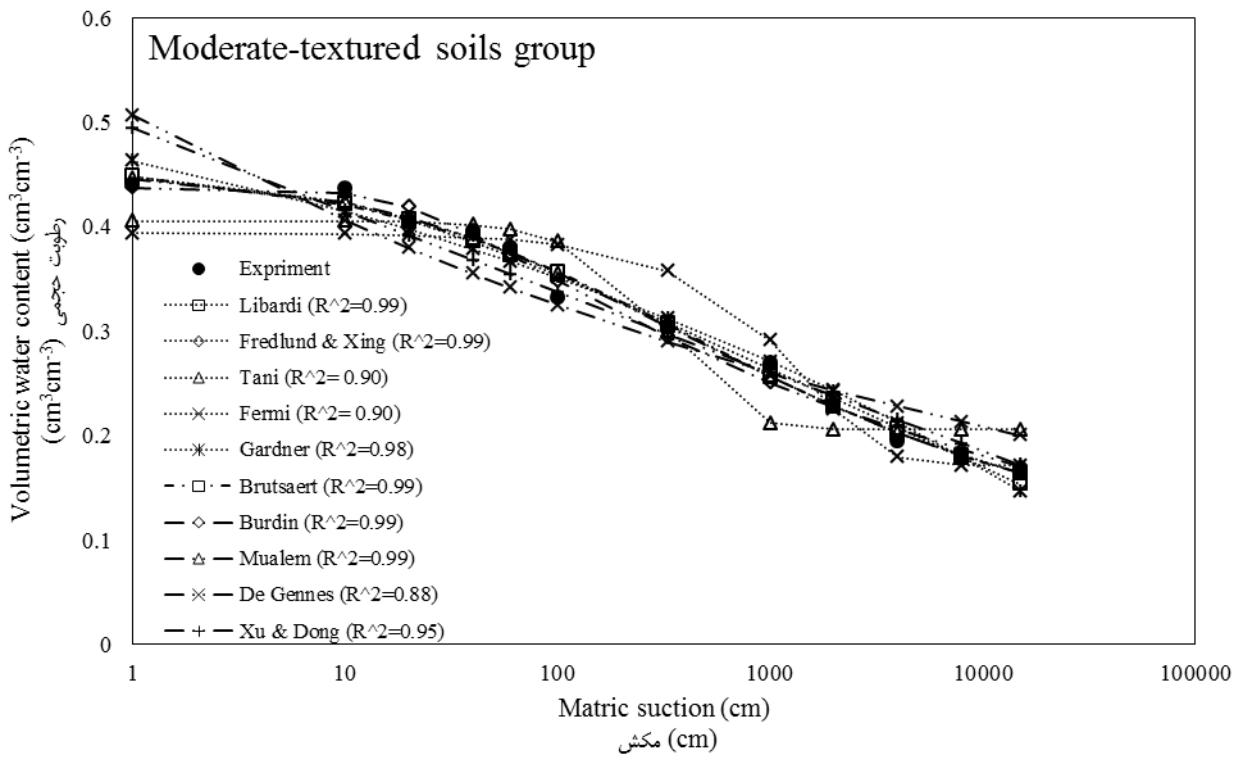
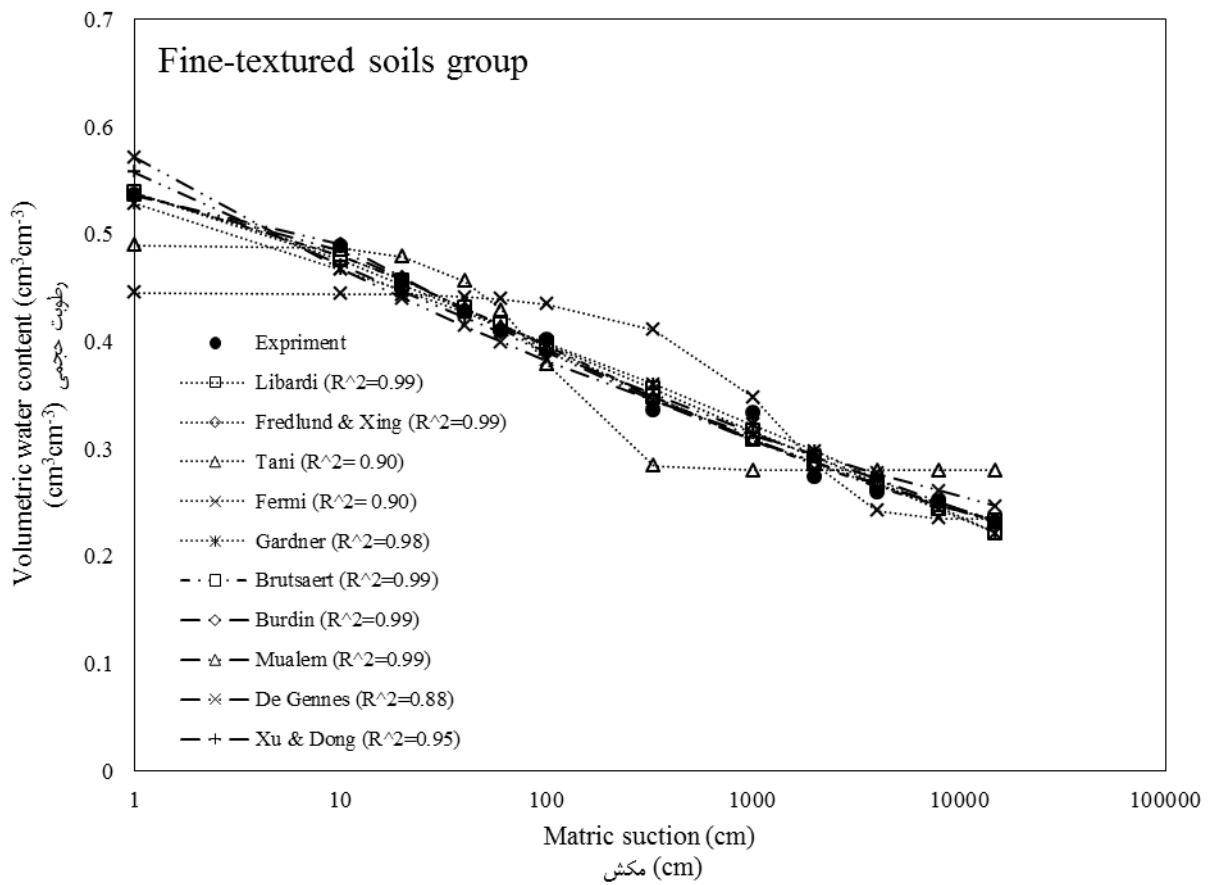
جدول ۶- نتایج دقت برازش مدل‌های منحنی نگهداری آب خاک برای گروه خاک‌های درشت بافت

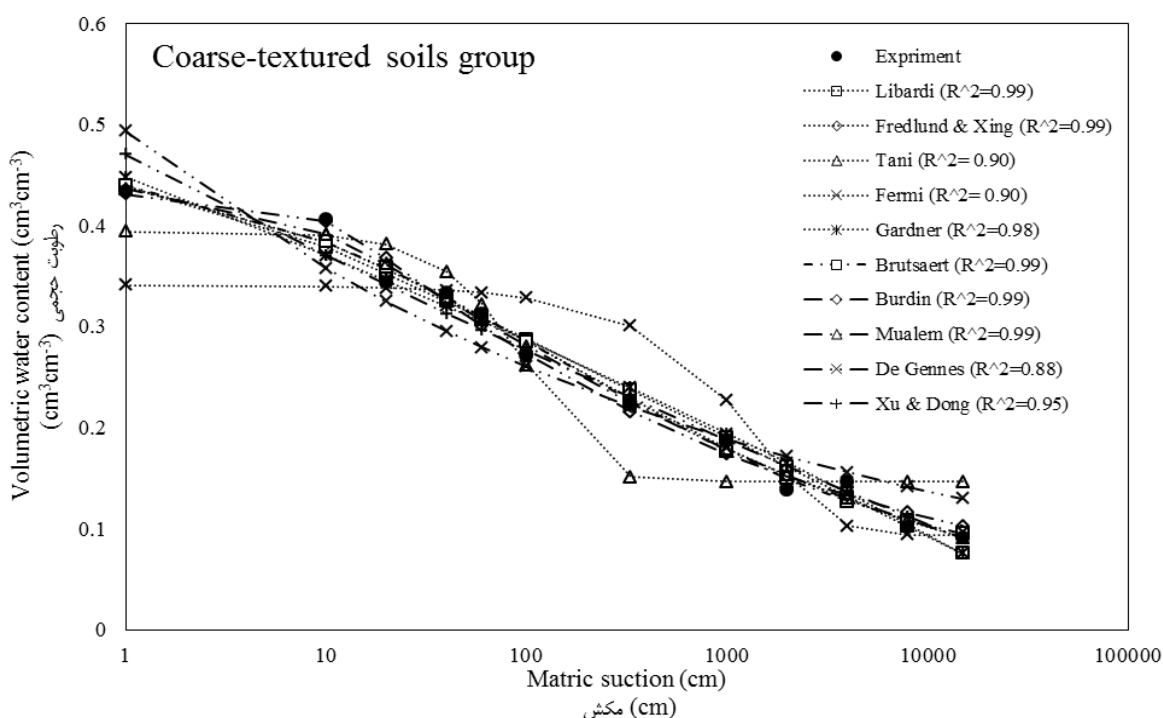
Table 6- The fitting accuracy of water retention curve models for coarse-textured soils group

مدل Model	معادله Equation	$RMSE (cm^3 cm^{-3})$		$AICc$		R^2	
		میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD	میانگین Mean	SD
فردلاند و وزینگ (۱۹۹۴) Fredlund and Xing (1994)	Power law	0.024a	0.013	-75.8a-d	13.2	0.977a	0.022
ون‌گنوختن-بوردین (۱۹۵۳) van Genuchten-Burdine (1953)	Power law	0.024a	0.015	-80.3ab	14.5	0.974a	0.020
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹) Libardi et al. (1979)	Logarithm	0.028ab	0.016	-80.7a	14.4	0.964ab	0.027
ون‌گنوختن-معلم (۱۹۷۶) van Genuchten-Mualem (1976)	Power law	0.030ab	0.012	-74.0a-d	10.9	0.938ab	0.070
بروتسائرت (۱۹۶۶) Brutsaert (1966)	Power law	0.030ab	0.027	-77.4abc	17.0	0.898bcd	0.263
گاردنر (۱۹۵۶) Gardner (1956)	Power law	0.034ab	0.019	-71.5b-e	13.1	0.951ab	0.032
تانی (۱۹۸۲) Tani (1982)	Exponential	0.040b	0.012	-69.3cde	7.1	0.919abc	0.030
ژیو و دانگ (۲۰۰۴) Xu and Dong (2004)	Fractal	0.041b	0.021	-67.9de	14.2	0.934ab	0.041
دی‌گینز (۱۹۸۵) De Gennes (1985)	Fractal	0.053c	0.028	-65.1ef	14.3	0.868cd	0.070
فرمی (مکی . بامب، ۱۹۸۷) Fermi (McKee and Bumb, 1987)	Exponential	0.058c	0.026	-57.8f	10.2	0.842d	0.096

*- حروف کوچک انگلیسی در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) بین مدل‌ها مطابق آزمون دانکن می‌باشد. R^2 ، ضریب تعیین؛ $RMSE$ ، ریشه میانگین مربعات خطا؛ $AICc$ معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده و SD ، انحراف استاندارد می‌باشد.

* Similar letters in each column indicate no significant difference between models at $P < 0.05$ according to Duncan's test. $RMSE$, root mean square error; R^2 , coefficient of determination; $AICc$, corrected Akaike's information criterion and SD , standard deviation.





شکل ۲- مقایسه دقت برازش مدل‌ها برای یک نمونه خاک از هر گروه بافتی
Figure 2- A comparison of the fitting accuracy of models for a soil sample from each textural group

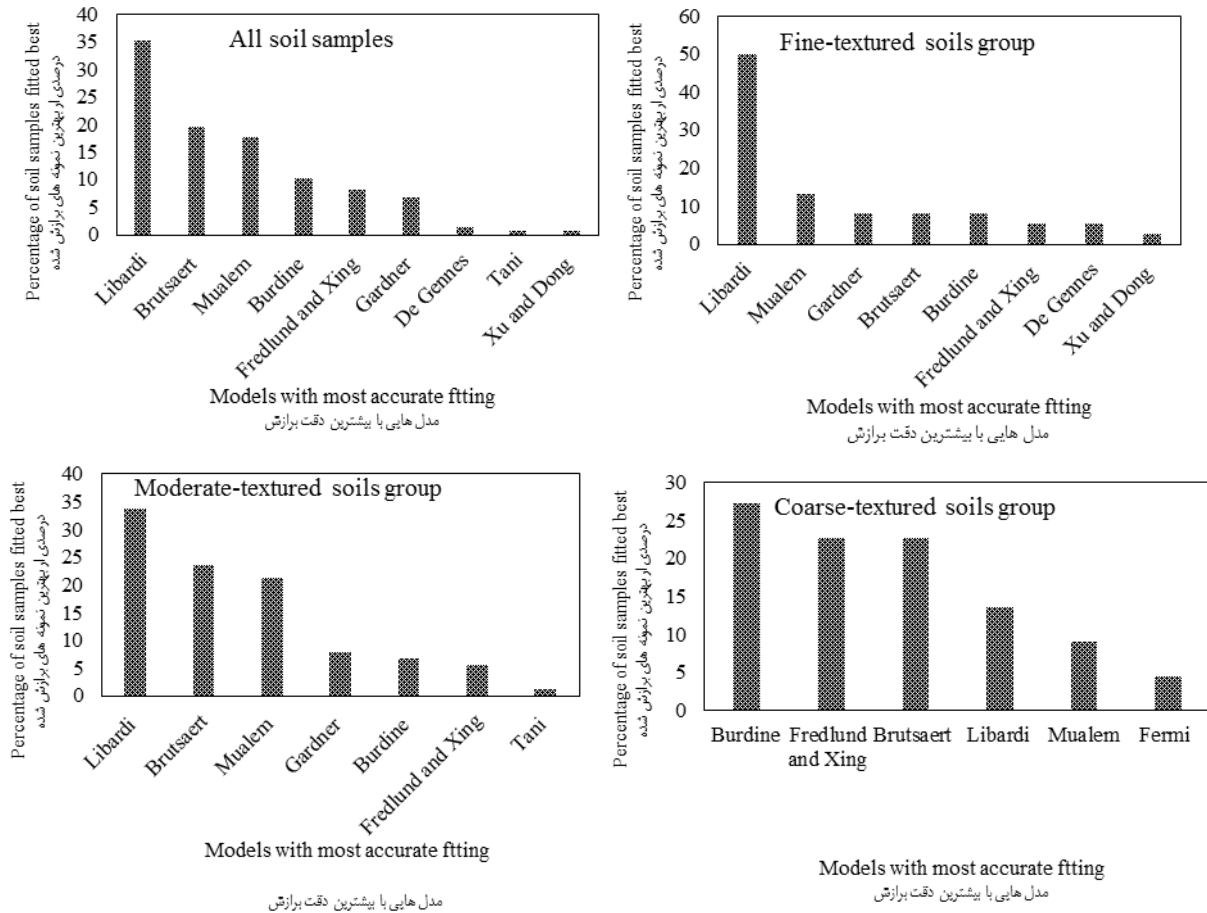
این پژوهش می‌باشد. به عبارت دیگر، این روش تنها نشان دهنده قدرت نسبی مدل‌ها در برازش به داده‌های تجربی است. برای کل نمونه‌های خاک به ترتیب مدل‌های لیباردی (۳۵ درصد)، پروتسائرت (۲۰ درصد) و ون‌گنوختن- معلم (۱۷ درصد) بالاترین کارایی نسبی را در بین سایر مدل‌ها داشتند. در گروه‌های بافتی مختلف، به ترتیب مدل‌های لیباردی (۵۰ درصد) و ون‌گنوختن- معلم (۱۳ درصد) برای خاک‌های گروه ریز بافت، همچنین مدل‌های لیباردی (۳۴ درصد)، پروتسائرت (۲۴ درصد) و ون‌گنوختن- معلم (۲۱ درصد) برای خاک‌های گروه متوسط بافت و در نهایت مدل‌های ون‌گنوختن- بوردین (۲۷ درصد)، فردلاند و زینگ و پروتسائرت (هر کدام ۲۳ درصد) و لیباردی (۱۴ درصد) برای خاک‌های گروه درشت بافت بالاترین کارایی نسبی را در بین سایر مدل‌ها داشتند. علت تفاوت در ترتیب مدل‌ها در شکل ۳ با ترتیب مدل‌ها در جدول‌های دقت برازش مدل‌ها برای کل نمونه‌های خاک و گروه‌های بافتی مختلف (جداول ۲ تا ۵)، احتمالاً می‌تواند در مقادیر انحراف استاندارد نتایج مدل‌ها باشد.

در مقابل، مدل‌های فرمی و تانی نتوانستند در هر سه گروه بافتی شکل سیگموئیدی منحنی نگهداری آب خاک را به واسطه تابع برازشی نمایشی که دارند، در هر سه ناحیه به خصوص در ناحیه ورود هوا و مویبندی به خوبی شبیه‌سازی کنند و در دو ناحیه مذکور دارای کم یا بیش تخمینی بودند. مدل فرکتالی دی‌گینز نیز نتوانست دقت برازش خوبی از SWRC را نشان دهد و با توجه به شکل ۲، این مدل در نقطه اشباع در گروه‌های بافتی متوسط و درشت، بیش برآوردی بالایی در تخمین داشت.

شکل ۳ نشان می‌دهد که هر کدام از مدل‌ها در چند درصد از نمونه‌های خاک (در کل نمونه‌ها و هر کدام از گروه‌های بافتی) بهترین برازش را به لحاظ آماره $RMSE$ داشته‌اند. برای مثال مدل ون‌گنوختن- بوردین در بین ۲۲ نمونه خاک گروه درشت بافت، در ۶ درصد خاک دارای کمترین مقدار $RMSE$ بود. حال برای محاسبه درصد آن خواهیم داشت:

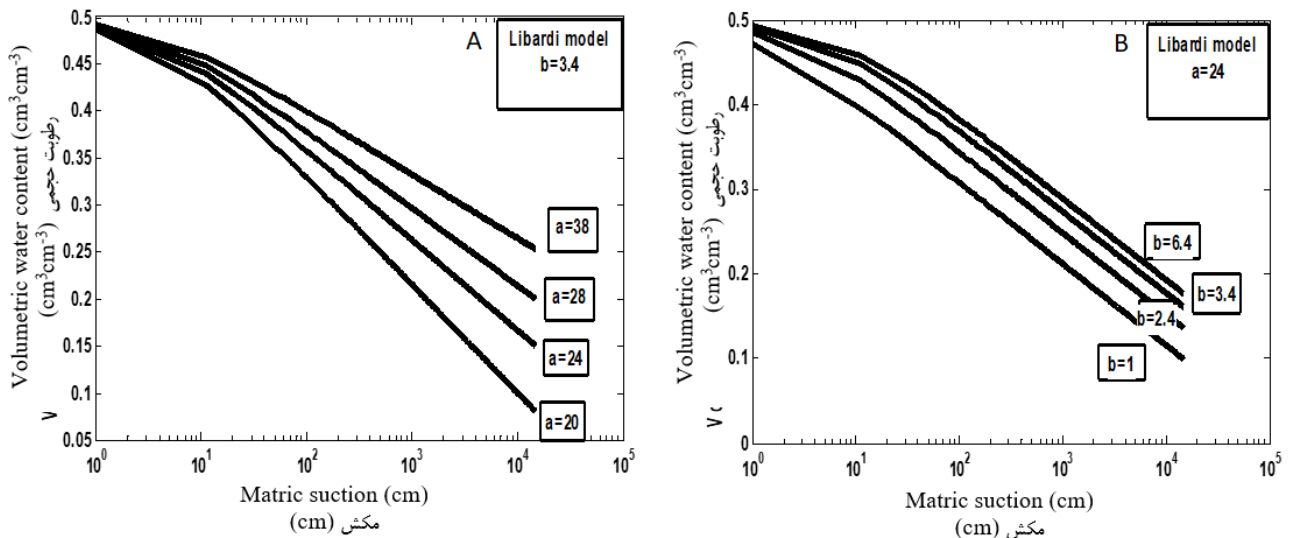
$$P = \left(\frac{6}{22} \right) \times 100 = 27.27 \quad (6)$$

شکل ۳ تنها نشان‌دهنده "کارایی نسبی" مدل‌های SWRC در



شکل ۳- کارایی نسبی مدل‌های SWRC برای کل نمونه‌های خاک و گروه‌های بافتی مختلف بر پایه معیار *RMSE*

Figure 3- Relative performance of the SWRC models for all soil samples and different textural groups, based on the *RMSE* criterion



شکل ۴- نمودار مدل لیباردی در حالی که یک پارامتر متغیر و پارامتر دیگر ثابت است، (A) a متغیر و b ثابت؛ (B) b متغیر و a ثابت

Figure 4- A plot of Libardi model while varying one parameter when the other parameter is constant, (A) a varying and b constant; and (B) b varying and a constant

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی قابلیت برازش ده مدل SWRC بر داده‌های تجربی منحنی نگهداری آب خاک و انتخاب بهترین مدل برای کل نمونه‌های خاک و برای هر کدام از گروه‌های بافتی ریز، متوسط و درشت خاک بود. بیشتر مدل‌های مطالعه شده دارای دقت مناسبی برای پیش‌بینی منحنی نگهداری آب خاک بودند. نتایج نشان داد مدل‌های فردلانند و زینگ، لیباردی، پروتسائرت، ون گنوختن-معلم و ون گنوختن-بوردین از نظر آماره ارزیابی $RMSE$ در مجموعه داده‌ها و گروه‌های بافتی بهترین دقت برازش را داشتند. بنابراین احتمال می‌رود که دقت این مدل‌ها وابستگی کمتری به گروه‌های بافتی داشته باشند. ارزیابی کارایی نسبی ده مدل در توصیف منحنی نگهداری آب خاک نشان داد که مدل سه پارامتری لیباردی در کل نمونه‌های خاک و همچنین گروه‌های بافتی ریز و متوسط از دقت بیشتر و یکنواختی به دلیل انحراف استاندارد پایین، در درصد بالایی از نمونه‌های خاک برخوردار بود. این توانایی از تعداد پارامترهای زیاد این مدل ناشی نمی‌گردد؛ زیرا مدل‌های فرمی، تانی، ژبو و دانگ و دی-گینز با تعداد پارامتر بیشتر و مشابه دارای کارایی کمتر بودند. بنابراین افزایش تعداد پارامترها همیشه تضمینی بر افزایش کارایی مدل‌ها نخواهد بود. به همین علت می‌توان از مدل لیباردی با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی منحنی نگهداری آب خاک که از ویژگی‌های مهم در فیزیک خاک است، استفاده نمود. البته تعمیم‌پذیری این نتایج مستلزم بررسی تعداد نمونه‌ها و مدل‌های بیشتر است. زیرا ممکن است دقت برازش این مدل با گروه‌ها و کلاس‌های بافتی متفاوت باشد، که نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

به طوری که با بررسی انحراف استاندارد مدل‌ها مشخص شد که مدل فردلانند و زینگ در گروه‌های بافتی متوسط و ریز و همچنین مدل پروتسائرت در کل نمونه‌های خاک و گروه‌های بافتی ریز و درشت دارای انحراف استاندارد بالاتری نسبت به مدل لیباردی هستند، که نشان دهنده‌ی بالا بودن میزان پراکنش داده‌ها از میانگین آن‌ها می‌باشد. در بررسی کل نمونه‌های خاک و اکثر گروه‌های بافتی مختلف (به جز گروه بافتی درشت)، مدل لیباردی بالاترین کارایی نسبی را در بین سایر مدل‌ها داشته و بهترین برازش را نشان داده است.

شکل ۴ تأثیر پارامترهای مدل لیباردی را بر منحنی نگهداری آب خاک نشان می‌دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد که پارامترهای a و b به ترتیب می‌توانند شیب و موقعیت منحنی را در هر سه ناحیه شامل ناحیه‌های ورود هوا، موئینگی و اشباع باقی‌مانده، تحت تاثیر قرار دهند. همچنین با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده کرده که این مدل می‌تواند شکستگی ناحیه ورود هوا را به خوبی شبیه‌سازی کند. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش نبی‌زاده و بیگی هرچگانی (۲۶) که نتایج خوبی از مدل لیباردی گزارش کردند، نیز مطابقت دارد. آنچه که در هر سه گروه بافتی و کل نمونه‌های خاک مشخص است عملکرد تقریباً مشابه و برتر در مدل‌های فردلانند و زینگ، پروتسائرت، ون گنوختن-معلم و ون گنوختن-بوردین، به دلیل داشتن تابع برازشی یکسان قاعده توانی، می‌باشد. از طرفی این مدل‌ها دارای نقطه عطفی در ناحیه موئینگی منحنی نگهداری آب خاک هستند که بهتر می‌تواند تغییرات شیب این ناحیه را توصیف کنند و در نهایت باعث عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های فرکتال که در ناحیه موئینگی دقت برازش لازم را نداشتند (شکل ۲)، می‌شود (۱).

منابع

- 1- Abbasi F. 2014. Advanced soil physics (Vol. 108). Tehran: University of Tehran press.
- 2- Assouline S., Tessier D., and Bruand A. 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. Water Resources Research 34(2): 223-231.
- 3- Bayat H., Ebrahimi I., Rastgou M., Zare Abyaneh H., Davatghar N., and Safari Sinegani A.A. 2013. Fitting different soil water characteristic curve models on the experimental data of various textural classes of guilan province soils. Water and Soil Science (Persian) 23(3): 151-167.
- 4- Brutsaert W. 1966. Probability laws for pore-size distributions. Soil Science 101(2): 85.
- 5- Burdine N. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. Journal of Petroleum Technology 5(3): 71-78.
- 6- Burnham K.P., and Anderson D.R. 2004. Multimodel inference understanding AIC and BIC in model selection. Sociological Methods and Research 33(2): 261-304.
- 7- Cornelis W.M., Khlosi M., Hartmann R., Van Meirvenne M., and De Vos B. 2005. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. Soil Science Society of America Journal 69: 1902-1911.
- 8- Dadmehr R., Sobhani M., and Zeynalzadeh K. 2006. Comparison of fitting ability in some soil moisture models, first national conference on irrigation and drainage networks management, Ahvaz, Chamran University.
- 9- Dane J., and Hopmans J.W. 2002. 3.3. 2 Laboratory. Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods (methods of soil an 4), 675-719.

- 10- De Gennes P. 1985. Partial filling of a fractal structure by a wetting fluid *Physics of disordered materials* (pp. 227-241): Springer.
- 11- Desbarats A. 1995. Upscaling Capillary Pressure-Saturation Curves in Heterogeneous Porous Media. *Water Resources Research* 31(2): 281-288.
- 12- Fooladmand H.R., and Golkar P. 2018. Fitting different models of soil-moisture characteristic curve on 30 soil samples in Fars province. *Journal of Water and Soil Conservation* 25(1): 319-326.
- 13- Fredlund D.G., and Xing A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31(4): 521-532.
- 14- Gardner W. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Science Society of America Journal* 20(3): 317-320.
- 15- Gee G., and Bauder J. 1986. Particle-size analysis *Methods of soil analysis, Part 1*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Journal.
- 16- Habibpour Gatabi K., and Safari Shali R. 2016. *Comprehensive manual for using SPSS in survey researches*. Tehran: Luye press.
- 17- Hodnett M., and Tomasella J. 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma* 108(3-4): 155-180.
- 18- Kern J.S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 59(4): 1134-1141.
- 19- Kozak E., Sokołowska Z., Stępniewski W., Pachepsky Y.A., and Sokołowski S. 1996. A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1291-1297.
- 20- Libardi P., Reichardt K., and Nascimento-Filho V. 1979. Análise da redistribuição da água visando a condutividade hidráulica do solo. *Energia Nuclear & Agricultura* 1: 108-122.
- 21- Manyame C., Morgan C., Heilman J., Fatondji D., Gerard B., and Payne W. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma* 141(3): 407-415.
- 22- McKee C., and Bumb A. 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *SPE formation Evaluation* 2(4): 599-608.
- 23- Millan H., Gonzalez-Posada M., Aguilar M., Dominguez J., and Cespedes L. 2003. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. *Geoderma* 117(1): 117-128.
- 24- Mirzaee S., and Ghorbani Dashtaki S. 2015. Investigation and comparison of the evaluation indicators efficiency of soil water retention curve models. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 9(2): 274-282.
- 25- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3): 513-522.
- 26- Nabizadeh E., and Beigi Harchegani B. 2011. The fitting quality of several water retention models in soil samples from lordegan, charmahal-va-bakhtiari. *Journal of Water and Soil (Persian)* 25(3): 634-645.
- 27- Patil N., Pal D., Mandal C., and Mandal D. 2011. Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural networks approaches to estimate AWC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(2): 177-184.
- 28- Sillers W.S., Fredlund D.G., and Zakerzaheh N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering* 19(3-4): 243-283.
- 29- Tani M. 1982. The properties of a water-table rise produced by a one-dimensional, vertical, unsaturated flow. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 64.
- 30- Xu Y., and Dong P. 2004. Fractal approach to hydraulic properties in unsaturated porous media. *Chaos, Solitons & Fractals* 19(2): 327-337.

The Effect of Textural Groups on the Accuracy of Soil Water Retention Curve Models

M. Rastgou¹- H. Bayat^{2*} - M. Mansoorizadeh³

Received: 10-09-2018

Accepted: 13-01-2019

Introduction: The soil-water retention curve (SWRC) is the relationship between the soil water content and matric potential of soil water. The SWRC is a fundamental soil characteristic, which is essential to determine parameters of numerous processes in the soil such as infiltration, drainage, solute movement and water availability for plants. It is also a key parameter in the study of the strength and compression of unsaturated soil. Direct field or laboratory measurement of soil water retention is costly, laborious and time-consuming. During the past four decades many models have been introduced to describe soil water retention curve, but their fitting capability in different textural groups have rarely been investigated. A good mathematical representation is the model that reduces the discrepancy between the observed and predicted data. Therefore, the aim of this study was to evaluate the ability of 10 SWRC models in fitting to the experimental data and determine the best model among them for the SWRC of all soil samples and for each soil textural groups in the entire soil water range, near saturation to near oven dryness.

Materials and Methods: In this study, 145 disturbed and undisturbed soil samples were taken from top soils and subsoil's of Guilan, Hamedan and Kermanshah provinces from different depths and were classified into textural groups after textural measurements. Water content were measured at 12 matric potentials. The SWRC models were fitted to the observed SWRC data of 145 soils using an iterative nonlinear optimization procedure. The latter finds the values of the fitting parameters giving the best fit of the model to the data. The optimization procedure was applied using the least square curve fitting toolbox of the MATLAB software to find the values of the fitting parameters. The coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) were used as relative measures of the goodness-of-fit of the SWRC models to the experimental data. Corrected Akaike information criterion (AICc) that imposes penalties for additional fitting parameters was used to compare the quality of models fitting.

Results and Discussion: The results showed that the Fredlund and Xing model in all soil samples and as well as in the coarse-textured group, the Libardi model in the fine-textured group and the Brutsaert model in the moderate-textured group had the most accurate fitting results, but their differences were not significant $P < 0.05$ in the all soil samples and each of textural groups. The Brutsaert and Fredlund and Xing models provided a continuous mathematical function for the entire SWRC. The better performance of these models may be due to their physical basis that could describe the SWRC accurately. On the other hand, the parameters of the Libardi model can affect and control the slope and the position of the SWRC in all three areas, including the capillary saturation, de-saturation and residual saturation and the effect of one parameter can be easily distinguished from the effect of the another parameter. Also, according to parametric study of the Libardi model, it can well simulate the break point of the air entry value. Although the fractal models have physical and mathematical basis, they do not have the adequate flexibility to describe the SWRC. A poor performance of fractal models in the present study may be due to terms of "3-D" (the result of this term was less than one). Therefore, fractal models were not successful in predicting the sigmoid shape of the entire SWRC. Fermi and Tani models with exponential functions had weakest performance. The poorer performance of the Fermi and Tani models in the present study may be due to lack of convergence of their parameters. It is generally accepted that the lack of convergence of parameters is an indication that the data cannot be fitted to the model well.

Conclusions: Comprehensive comparisons of SWRC models will be of value to future model users, but it is important to note that such comparisons will remain dataset dependent. In other words, these results can help the

1 and 2- Ph.D. Student of Soil Science and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.bayat@basu.ac.ir).

3- Assistant Professor, Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

users to choose SWRC models for fitting to the experimental data accurately in case there are limitations to the number of matric potential-water content measured points. Finally, the Libardi model is introduced as the best model for representing the wide range of the soil matric potentials due to the lower number of parameters, the physical concept of the parameters, and the simple form of its equation.

Keywords: Fitting ability, Model, Soil water retention curve, Textural groups