

## ارزیابی عملکرد توابع انتقالی برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های مختلف با مدل SWRC

امید بهمنی<sup>۱</sup>\* و بهرام رضانی

استادیار دانشگاه بوعلی سینا.

omid.bahmani@basu.ac.ir

دانشجوی سابق کارشناس ارشد دانشگاه بوعلی سینا.

b.ramazani63@gmail.com

چکیده

منحنی نگهداشت آب در خاک (SWRC) اهمیت فراوانی در مطالعات مربوط به رابطه آب و خاک، حفاظت خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، زهکشی، انتقال املاح، رشد گیاهان و بررسی تنش آبی گیاهان دارد. در این پژوهش عملکرد ۱۰ مدل منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مدل (سایمونز و همکاران ۱۹۷۹، لیباردی و همکاران ۱۹۷۹، کمپل ۱۹۷۴، فارل و لارسون ۱۹۷۲، ون‌گنوختن ۱۹۸۰، بروکس و کوری ۱۹۶۴، درایزن ۱۹۸۶، نمایی بروس-لاکسمور ۱۹۸۶، توانی بروس-لاکسمور ۱۹۸۶ و روگوسکی ۱۹۷۱) با استفاده از مدل SWRC 3.0 بررسی شد و پس از ارزیابی آماری، مدل‌های مناسب انتخاب شدند. هفتاد و سه نمونه خاک از جای‌کاری‌های شهرستان لاهیجان در استان گیلان جمع‌آوری، کلاس بافتی آنها تعیین و گروه‌های بافتی از هم تفکیک شدند. مقدار رطوبت در هشت پتانسیل ماتریک مختلف اندازه‌گیری شد. با محاسبه شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص آکائیک (AIC) و ضریب تبیین ( $R^2$ )، کیفیت برازش مدل‌ها مشخص گردیدند. نتایج نشان داد در همه‌ی کلاس‌های بافتی مدل سایمونز و همکاران با حداقل خطای (RMSE) (از ۰/۱۳۶ تا ۰/۰۳۰۷  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) و کمترین ضریب آکائیک برابر با ۱۲۸۰- و حداکثر ضریب تبیین (از ۰/۹۶ تا ۰/۹۸) و مدل توانی بروس-لاکسمور با حداکثر خطای (RMSE) (از ۰/۰۳۷۲ تا ۰/۰۸۸۱  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) و بیشترین ضریب آکائیک برابر با ۸۷۹- و حداقل ضریب تبیین (از ۰/۸۱ تا ۰/۹۲)، به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. مدل لیباردی و همکاران نیز بعد از مدل سایمونز و همکاران عملکرد قابل قبولی داشت و بهتر از سایر مدل‌ها شبیه‌سازی را انجام داد. به همین دلیل، استفاده از مدل سایمونز و همکاران و مدل لیباردی و همکاران برای خاک‌های شهرستان لاهیجان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات هیدرولیکی خاک، جریان غیر اشباع، بافت خاک.

۱- آدرس نویسنده مسئول: همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب

\*- دریافت: تیر ۱۳۹۲ و پذیرش: دی ۱۳۹۳

## مقدمه

وابسته. اگر چه اکثر توابع انتقالی برای پیش بینی خصوصیات هیدرولیکی خاک توسعه یافته اند، اما علاوه بر این برای تخمین ویژگیهای فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و بیولوژیکی خاک نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (مک برانتی و همکاران، ۲۰۰۲).

ابولپور (۱۳۷۷) منحنی رطوبتی دو نمونه خاک را با استفاده از منحنی دانه‌بندی تخمین زد و این روش را برای خاک‌های ریز بافت مناسب دانست. او نشان داد که بافت خاک می‌تواند بر عملکرد مدل‌های منحنی رطوبتی مؤثر باشد. افراسیاب (۱۳۸۰) در پژوهش خود مدل کمپل را واسنجی نمود و نتیجه گرفت این مدل در مکش‌های پایین، دقیق‌تر از مکش‌های بالا عمل می‌کند. همچنین، از آنجایی که مدل کمپل بر نقاط ابتدایی و انتهایی منحنی تطابق بهتری دارد، استفاده از این مدل را برای برآورد مقدار رطوبت در دو نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم توصیه کرد.

ارزیابی مدل کمپل در خاک‌های دشت سراب توسط رضایی و همکاران (۱۳۸۰) به انجام رسید و نتایج آزمایشگاهی منحنی رطوبتی را با مدل فیزیکی-تجربی کمپل مقایسه کردند. در این پژوهش، مشخص شد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از مدل کمپل تفاوت معنی‌داری ندارند و استفاده از مدل کمپل را توصیه کردند. قابلیت برازش دو مدل تجربی ساکستون<sup>۲</sup> و همکاران و هاتسون و کاس<sup>۳</sup> را با مدل ون‌گونوختن نشان داد که به ترتیب مدل‌های ون‌گونوختن، ساکستون و همکاران، و هاتسون و کاس بهترین برازش را دارند (کشکولی و زینال زاده، ۱۳۸۰).

در پژوهشی دادمهر و همکاران (۱۳۸۵) قابلیت برازش مدل‌های رالز و همکاران<sup>۴</sup>، کمپل، ساکستون و همکاران و هاتسون و کاس را با هم مقایسه کردند. نتایج ارزیابی آنها نشان داد که مدل هاتسون در برآورد منحنی

منحنی رطوبتی خاک<sup>۱</sup> (SWRC) بیانگر حالات مختلف رطوبتی خاک است، به طوری که در یک مزرعه با تعیین منحنی رطوبتی خاک می‌توان به وضعیت رطوبتی خاک پی برده و میزان آب قابل استفاده گیاه را در عمق مورد بررسی، تعیین نمود (بایوردی، ۱۳۸۳). منحنی رطوبتی خاک می‌تواند در آزمایش‌های تنش خشکی و کم‌آبایی و همچنین برای اعمال مدیریت صحیح آبیاری در مزرعه، بسیار مفید بوده و استفاده شود. SWRC رابطه میزان رطوبت خاک را با مکش ماتریک خاک نشان می‌دهد و یک ویژگی پایه‌ای برای مطالعه آب قابل دسترس برای گیاه، پدیده‌های نفوذ، زهکشی، هدایت هیدرولیکی، آبیاری، تنش آبی گیاهان و حرکت مواد محلول در خاک است (رومانو و چریکو، ۲۰۰۴).

تعیین منحنی رطوبتی از طریق اندازه‌گیری مستقیم آنها کاری پرهزینه، مشکل و وقت‌گیر است. بنابراین استفاده از روش‌های غیرمستقیم به جای اندازه‌گیری مستقیم اجتناب‌ناپذیر است. اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی از یک سو و محدود بودن توابع انتقالی توسعه‌یافته برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک-های ایران از سوی دیگر، می‌تواند بیانگر اهمیت مطالعه و پژوهش در خصوص توابع انتقالی باشد (ساکسون و همکاران، ۱۹۸۶).

بنابراین می‌توان گفت ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی و امکان سنجی بهبود بخشیدن به عملکرد این توابع با تخمین صحیح‌تر ضرایب مربوط به آنها امری ضروری است. مدل‌های منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به دو صورت ممکن است بیان شوند: الف) پتانسیل ماتریک ( $\psi_m$ ) به عنوان متغیر وابسته و درصد رطوبت خاک ( $\theta$ ) به عنوان متغیر مستقل و ب) پتانسیل ماتریک ( $\psi_m$ ) به عنوان متغیر مستقل و درصد رطوبت خاک ( $\theta$ ) به عنوان متغیر

<sup>2</sup> Saxton<sup>3</sup> Hutson & Cass<sup>4</sup> Rawls et al.<sup>1</sup> Soil Water Retention Curve

که باعث عملکرد بهتری نسبت به مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) و همچنین مدل کمپل (۱۹۷۴) در بسیاری از خاک‌ها می‌شود. در برآورد پارامترهای مدل رطوبتی ون-گنوختن (۱۹۸۰) در تعدادی از خاک‌های مناطق حاره کشور برزیل، تجزیه آماری نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) در توابع انتقالی ارائه شده به مراتب کمتر از حالتی بود که از همین توابع انتقالی در مناطق معتدل استفاده شد (توماسلا و هودنت، ۱۹۹۸).

راجکائی و همکاران (۲۰۰۴) از مدل چهار پارامتری ون‌گنوختن برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی در ۳۰۵ نمونه از خاک‌های کشور مجارستان استفاده کردند. آنها کاربرد یک نقطه نگهداشت رطوبتی بعنوان متغیر ورودی در توابع خود را موثر دانسته و به افزایش ۲۵ درصدی کارایی توابع خود اشاره نمودند. نمس و راولز (۲۰۰۶) کارآمدی تعدادی از خصوصیات توزیع اندازه ذرات را در برآورد میزان رطوبت خاک در پنانسیل های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال، مورد بررسی قرار دادند. آنها هیچ خصوصیت خاصی را به عنوان یک عامل بسیار موثر در برآورد ویژگیهای هیدرولیکی خاک معرفی نکردند.

مقایسه روش‌های رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون غیر وابسته در تخمین ضرایب معادله ون-گنوختن نشان داد که به جز در برآورد مقدار رطوبت باقیمانده، این روش‌ها در تخمین سایر ضرایب با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند (مردون، ۲۰۱۰).

مانیام و همکاران (۲۰۰۷) عملکرد دو مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن و کمپل را در خاک‌های شنی نیجریه با هم مقایسه کردند و دریافتند که دقت مدل کمپل از مدل ون‌گنوختن برای نمونه‌های خاک با درصد شن بالاتر بیشتر بود. همچنین، برآورد مدل ون‌گنوختن در ناحیه خشک منحنی رطوبتی (مکش بالا) بیشتر از مقدار واقعی بود و در ناحیه مرطوب (مکش کم) عملکرد خوبی نشان داد. این پژوهش نشان داد که همیشه مدل دارای پارامترهای بیشتر، لزوماً دارای کارایی بیشتر نیست.

رطوبتی خاک موفق‌تر عمل می‌کند. مدل ساکستون نیز با استفاده از بافت خاک برازش قابل قبولی به خصوص در مکش‌های بالا ایجاد نمود. ترابی و همکاران (۱۳۸۶) کارایی شش مدل راولز و براکنسیک، وریکن و همکاران، وستن و همکاران، قربانی دشتکی و همایی، فرخیان فیروزی و همایی را بررسی کردند. از آنجایی که نتایج بدست آمده در این پژوهش چندان مطلوب نبودند، بر لزوم تهیه توابع انتقالی مناسب برای خاک‌های گچی و آهکی ایران تاکید شد.

بررسی منحنی رطوبتی نشان داده که وابستگی زیادی بین مقادیر شن، رس و چگالی ظاهری با رطوبت حجمی خاک در نقاط مختلف منحنی رطوبتی بخصوص نقاط FC و WP مشاهده شده است (بوتولا و همکاران، ۲۰۱۲).

مؤزنزاده و همکاران (۱۳۸۷) عملکرد سه تابع انتقالی، مدل‌های اول و دوم قربانی و همایی (۱۳۸۲) و مدل سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲) را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی در نمونه‌هایی از خاک‌های شمال کشور با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در مرحله ارزیابی توابع موجود، مدل‌های اول و دوم قربانی و همایی در برآورد رطوبت در تمام بازه پتانسیل ماتریک یکسان و تقریباً مناسب عمل کردند. ولی تابع سپاسخواه و بندار برآورد مناسبی نداشتند.

کمپل (۱۹۷۴) مدل سه پارامتری را ارائه نمود که مکش نقطه‌ی ورود هوا به خاک را یک نقطه‌ی شکست منحنی فرض کرده است در حالیکه در خاک‌های ریز بافت این شکست وجود ندارد. یکی از رایج‌ترین مدل‌ها برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) است زیرا شکل سیگموئیدی و پیوسته‌ای از منحنی رطوبتی را تخمین می‌زند. از مزایای این مدل می‌توان انعطاف‌پذیری بالا و استفاده از دامنه مکش‌های بالا و قابلیت برازش بر خاک‌های متفاوت را نام برد. پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند و مقدار مکش را در نقطه ورود هوا به خاک محاسبه نمی‌کند ولی نقطه عطفی دارد

ورود هوا به خاک تعریف می‌شود و  $\lambda$  ضریب توزیع اندازه منافذ خاک است که روی شیب تابع نگهداشت رطوبت تاثیر می‌گذارد. هرچه اندازه منافذ خاک دارای دامنه‌ی توزیع وسیع‌تری باشد،  $\lambda$  کوچک‌تر می‌شود.  $\lambda$  از طریق برازش داده‌های  $\Psi$  و  $\theta$  بدست می‌آید. این معادله در توصیف منحنی رطوبتی خاک‌های درشت بافت و نمونه‌های دست نخورده موفق بوده است و در رطوبت-های نزدیک نقطه پژمردگی، نتایج دقیق‌تری می‌دهد (ترابی و قهرمان، ۱۳۸۶).

در مدل ون‌گنوختن  $m, \alpha$  و  $n$  ضرایبی هستند که شکل منحنی رطوبتی را مشخص می‌کنند. مقدار عددی  $\alpha$  تقریباً برابر با عکس بار فشار در نقطه ورود هوا به خاک است. در حال حاضر در شبیه‌سازی جریان غیر اشباع آب در خاک از معادله ون‌گنوختن استفاده زیادی می‌شود. همچنین  $n = \lambda + 1$  و  $m = 1 - 1/n$  هستند. ضریب  $n$  شیب منحنی  $S$  شکل را کنترل می‌کند. در مدل روگوسکی  $\Psi_e =$  پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک (cm)،  $\theta_{15} =$  رطوبت خاک در نقطه پژمردگی ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )،  $\psi_{15} =$  پتانسیل مکش در نقطه پژمردگی (cm) و  $\theta_e =$  رطوبت خاک در نقطه ورود هوا به خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) هستند.

### ارزیابی مدل‌ها

با توجه به این‌که پارامترهای ورودی هر مدل با هم تفاوت داشتند، از شاخص‌های آماری بیشتری برای ارزیابی استفاده شد. این شاخص‌ها شامل ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE)^3$ ، شاخص آکائیک (AIC)<sup>4</sup> و ضریب تبیین  $(R^2)^5$  بودند.

اهداف مورد نظر در این پژوهش شامل: تعیین بهترین مدل از بین ۱۰ مدل موجود در برنامه SWRC، برای تخمین مناسب منحنی رطوبتی خاک، انتخاب بهترین مدل برای گروه‌های بافتی متفاوت و بررسی اثر کلاس بافت خاک بر عملکرد این مدل‌ها است.

### مواد و روش‌ها

تعداد ۷۳ نمونه خاک به صورت دست خورده و دست نخورده از اراضی چای‌کاری شهرستان لاهیجان استان گیلان جمع‌آوری شد شکل (۱). با استفاده از دستگاه صفحات فشاری<sup>۱</sup> و جعبه شن<sup>۲</sup> منحنی رطوبتی خاک در مکش‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۱۰۰، ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. ده تابع انتخابی جدول (۲) با روش حداقل مربعات خطا و الگوریتم نیوتن-رافسون ارزیابی شدند (دورانتو و همکاران، ۲۰۰۱). نمونه-ها بر اساس گروه بافتی به دو گروه بافت متوسط و سنگین و بر اساس طبقه‌های بافتی به شش طبقه، رسی (Clay)، لوم رسی (Clay Loam)، لوم سیلتی (Silty Loam)، لوم رسی سیلتی (Silty Clay Loam)، رسی سیلتی (Silty) و لوم (Loam)، تفکیک شد جدول (۱).

در کلیه مدل‌ها:  $\theta =$  رطوبت حجمی خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )،  $\theta_s =$  رطوبت حجمی اشباع خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )،  $\theta_r =$  رطوبت حجمی باقی‌مانده در خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) و  $\Psi =$  مکش ماتریک (cm). در مدل سایمونز و همکاران شاخص  $\phi$  رطوبت حجمی اشباع خاک و ضرایب تجربی این مدل  $\alpha$  و  $\beta$  هستند. در مدل نمایی بروس-لاکسمور  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب تجربی این مدل هستند که شکل منحنی رطوبتی را تعیین می‌کنند. در مدل کمپل  $\Psi_e$  پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا و  $\lambda$  پارامتر توزیع اندازه منافذ خاک هستند. در مدل فارل و لارسون ضریب  $\Psi_e$  نشان-دهنده شاخص مکش ورود هوا به خاک است. در مدل بروکس-کوری  $\alpha$  غالباً به عنوان عکس مکش در نقطه

<sup>3</sup> Root Mean Square Error

<sup>4</sup> Akaike

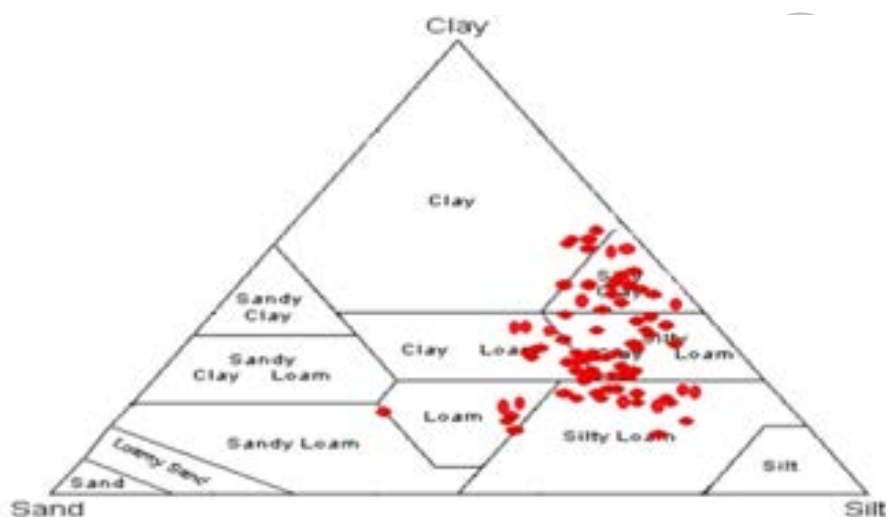
<sup>5</sup> Coefficient of Determination

<sup>1</sup> Pressure Plate

<sup>2</sup> Sand box

جدول ۱- درصد اجزای بافت خاک، گروه‌های بافت خاک در نمونه خاک‌های مورد مطالعه

گروه بافت	تعداد نمونه‌ها	کلاس بافت	رس %	سیلت %	شن %
بافت متوسط	۱۷	سیلتی لوم	۲۰	۵۸	۲۲
	۶	لوم	۲۴	۴۳	۳۳
بافت سنگین	۶	رسی	۵۷	۳۶	۷
	۱۳	لوم رسی	۳۱	۴۵	۲۴
	۲۰	لوم رسی سیلتی	۳۴	۵۳	۱۳
	۱۱	رسی سیلتی	۴۵	۴۸	۷



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

$K$ : تعداد پارامترهای ورودی مدل هستند. RMSE نشان‌دهنده میزان انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر مشاهده شده است، یا به عبارتی نشان‌دهنده پراکندگی داده‌هاست و هر چه این عدد مقداری کمتری را نشان دهد و به صفر نزدیکتر باشد، کارایی خوب مدل را بیان می‌کند. هر چه ضریب آکائیک (AIC) کوچکتر (منفی‌تر) باشد، نشان‌دهنده این است که دقت مدل بیشتر است.  $R^2$  نشان‌دهنده میزان همبستگی بین مقادیر برآورد شده و مقادیر مشاهده‌ای است.

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

$$AIC = n \ln \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right] + 2K \quad (2)$$

که در آن‌ها:

$P_i$ : مقادیر شبیه‌سازی شده یا پیش‌بینی شده،  $O_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده یا مشاهده‌ای،  $n$ : تعداد کل داده‌ها و

جدول ۲- مدل‌های منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

معادلات استفاده شده در نرم افزار

Exponential*(1986)	$\varphi = \alpha e^{-\beta\theta} \quad \beta > 0 \text{ and } 0 < \varphi < \alpha$	$\theta = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\varphi}{\alpha}\right)$
Simons et al.*(1979)	$\varphi = \alpha [e^{-\beta(\theta-\varphi)} - 1]$	$\beta < 0 \quad \theta = \varphi + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\varphi}{\alpha} + 1\right)$
Campbell*(1974)	$\varphi = \varphi_s \left[\frac{\theta_s}{\theta}\right]^\lambda$	$\varphi < \varphi_s \quad \theta = \theta_s$
Farrel & Larson*(1972)	$\varphi = \varphi_{crit} e^{\alpha\left(1 - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)}$	$\varphi < \varphi_{crit} \quad \theta = \theta_s$
	$\varphi \geq \varphi_{crit}$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 - \frac{1}{\varphi_{crit}} \ln\left(\frac{\varphi}{\varphi_{crit}}\right)\right]$
Libardi et al.* (1979)	$\varphi = \alpha [e^{\beta(\theta - \theta_s)} - 1]$	$\beta < 0 \quad \theta = \theta_s + \frac{1}{\beta} \ln\left[\frac{\varphi}{\alpha} + 1\right]$
Power*	$\varphi = \alpha \theta^{-\beta}$	$\varphi > 0 \quad \theta = \left(\frac{\varphi}{\alpha}\right)^{-\frac{1}{\beta}}$
Brooks & Corey** (1964)	$0 \leq \varphi < \frac{1}{\alpha}$	$\theta = \theta_s$
	$\varphi \geq \frac{1}{\alpha}$	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(\alpha\varphi)^{\frac{1}{2}}}$
Van Genuchten** (1980)	$\varphi \geq 0$	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\varphi)^n]^m}$
Driessen** (1986)	$\varphi \geq 1$	$\theta = \theta_s \varphi^{-\frac{1}{\ln(\varphi)}}$
Rogowski** (1971)	$0 \leq \varphi < \varphi_s$	$\theta = \theta_s$
	$\varphi \geq \varphi_s$	$\theta = \theta_s + \frac{\theta_{1s} - \theta_s}{\ln(\varphi_{1s} - \varphi_s + 1)} \ln(\varphi - \varphi_s + 1)$

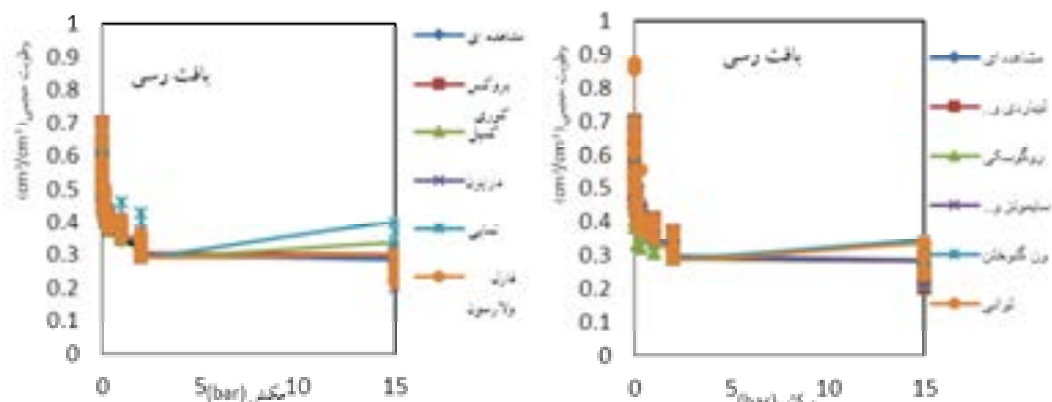
\*\*پتانسیل ماتریک ( $\Psi$ ) به عنوان متغیر وابسته و درصد رطوبت خاک ( $\Theta$ ) به عنوان متغیر مستقل

\*\*پتانسیل ماتریک ( $\Psi$ ) به عنوان متغیر مستقل و درصد رطوبت خاک ( $\Theta$ ) به عنوان متغیر وابسته

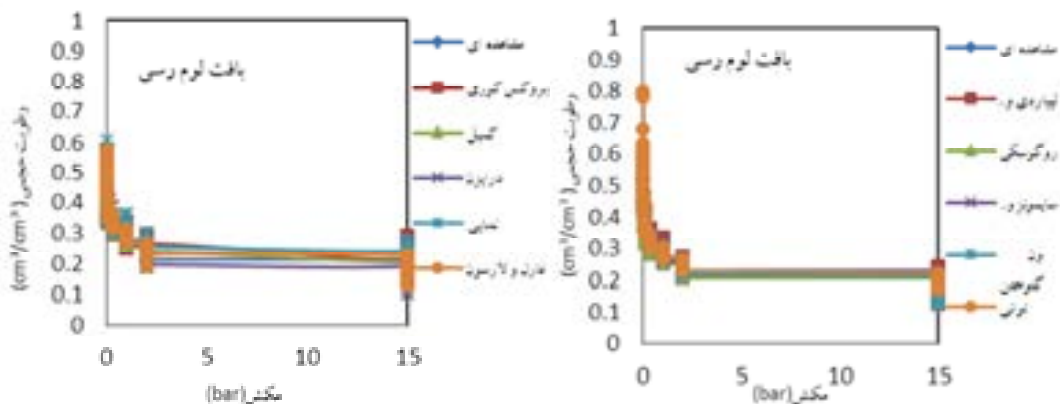
## نتایج و بحث

کلاس بافتی جدول (۱) بررسی شد. کیفیت برازش مدل-های متفاوت در طبقه‌های گوناگون خاک در شکل‌های (۲) تا (۷) نمایش داده شده‌اند. با استفاده از برنامه SWRC شبیه‌سازی منحنی رطوبتی در مورد مدل‌های ده گانه انجام شد که بررسی نتایج حاصل از ارزیابی آماری مدل‌ها حاکی از متفاوت بودن عملکرد مدل‌های مختلف در برآورد رطوبت بود. این موضوع در شکل‌های (۲) تا (۷) مشخص شده است.

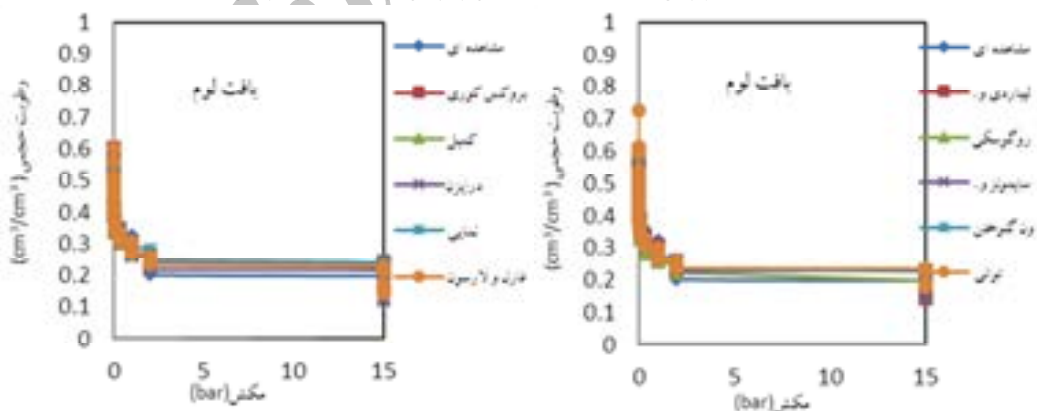
پس از تعیین درصدهای شن، سیلت و رس، طبقه بافتی هر نمونه از خاک تعیین شد. توزیع بافتی نمونه خاک‌های مطالعه شده در نمودار مثلث بافت خاک شکل (۱) نشان داده شده است. بافت لوم رسی سیلتی بیشترین تعداد را (۲۰ نمونه) شامل می‌شود. اکثر نمونه خاک‌ها در کلاس‌های بافتی متوسط تا سنگین قرار دارند. مدل مختلف منحنی نگهداشت رطوبتی در شش



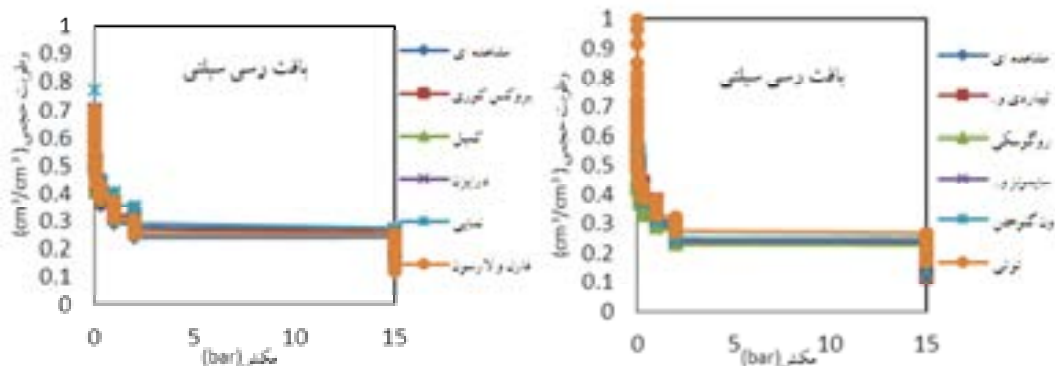
شکل ۲- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت رسی (Clay)



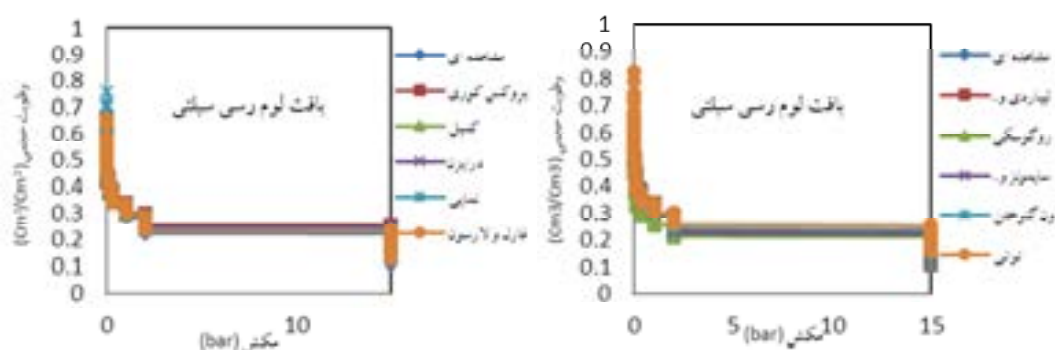
شکل ۳- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت لوم رسی (Clay Loam)



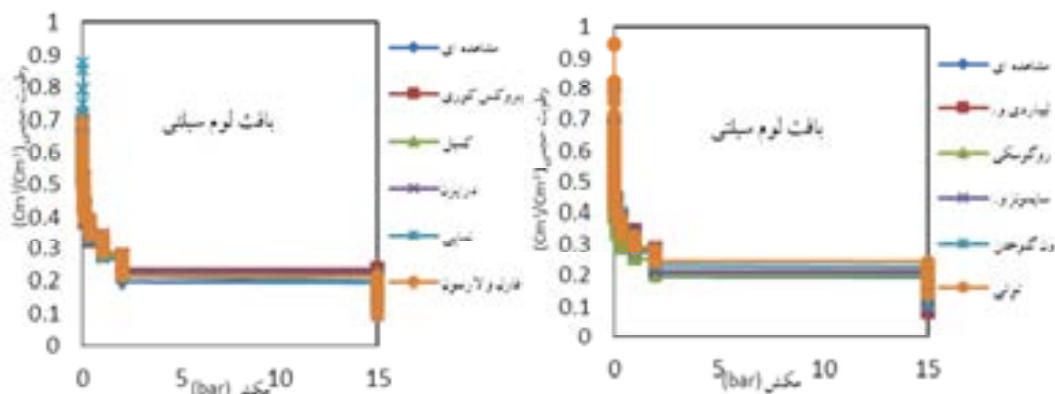
شکل ۴- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت لوم (Loam)



شکل ۵- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت رسی سیلتی (Silty Clay)



شکل ۶- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت لوم رسی سیلتی (Silty Clay Loam)



شکل ۷- مقایسه برازش ده مدل مختلف منحنی رطوبتی برای بافت لوم سیلتی (Silty Loam)

است. همچنین، مقایسه ضریب  $R^2$  نشان می‌دهد که در همه کلاس‌های بافتی بیشترین مقدار مربوط به مدل سایمونز و همکاران (از ۰/۹۶ تا ۰/۹۸) و سپس مدل لیاردی و همکاران (از ۰/۹۶ تا ۰/۹۸) است. این پارامترها بیانگر عملکرد خوب مدل‌های سایمونز و همکاران و مدل لیاردی و همکاران نسبت به سایر مدل‌هاست. نتایج

نتایج آماری حاصله در جداول (۳) تا (۵) نشان می‌دهند که در شش طبقه بافتی، مدل سایمونز و همکاران دارای کمترین RMSE (از ۰/۱۳۶ تا ۰/۳۰۷  $\text{Cm}^3 \text{Cm}^{-3}$ ) و ضریب AIC برابر با ۱۲۸۰- بوده و بعد از آن مدل لیاردی و همکاران دارای RMSE (از ۰/۱۳۹ تا ۰/۳۰۹  $\text{Cm}^3 \text{Cm}^{-3}$ ) و ضریب AIC برابر با ۱۲۶۷-



مقدار  $\lambda$ ، شیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در قسمت غیراشباع خاک بیشتر می‌شود. مدل بروکس-کوری برای خاک‌های درشت بافت با اندازه منافذ یکنواخت‌تر نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد اما در نزدیکی نقطه‌ی اشباع به خصوص در خاک‌های سنگین بافت، نتایج آن مناسب نیست (جیمز و همکاران، ۲۰۰۱). با توجه به اینکه خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش میان‌بافت و سنگین بافت هستند، می‌توان گفت نتایج بدست آمده قابل قبول است.

دقت مدل ون‌گنوختن نیز در تمامی طبقه‌های بافتی نسبت به مدل بروکس و کوری بیشتر است که ممکن است به علت بافت متوسط و ریز بافت بودن خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش باشد که نتایج برازش بهتری توسط مدل ون‌گنوختن نسبت به مدل بروکس و کوری به دست آمده است زیرا در این خاک‌ها، مکش ورود هوا به خاک به سرعت رخ نمی‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بین دو مدل کمپل و ون‌گنوختن، مدل کمپل از نظر دقت برازش بهتر است. نتایج این پژوهش با یافته‌های مانیم و همکاران (۲۰۰۷) مشابه است.

حاصل از مقایسه میانگین توسط آزمون t بین دو مدل سایمونز و همکاران و لیباردی و همکاران تفاوت معنی داری در سطح پنج درصد نشان نداد. بیشترین RMSE در همه نمونه‌های خاک (از ۰/۰۳۷۲ تا ۰/۰۸۸۱  $\text{Cm}^3 \text{Cm}^{-3}$ ) و بیشترین ضریب AIC برابر با ۸۷۹- و کمترین مقدار  $R^2$  (از ۰/۸۱ تا ۰/۹۲) مربوط به مدل توانی بروس-لاکسمور بوده و که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این مدل است.

مدل‌های توانی بروس-لاکسمور، روگوسکی، نمای بروس-لاکسمور و بروکس و کوری از میان مدل‌های استفاده شده دقت ضعیف‌تری در برازش بر داده‌های اندازه‌گیری تجربی از خود نشان دادند و در اکثر طبقه‌های بافتی دارای تفاوت معنی داری در سطح پنج درصد بودند به جزء بافت لومی و رسی که در این بافت مدل روگوسکی دارای تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد بود و بقیه مدل‌ها تفاوت معنی داری در سطح پنج درصد از خود نشان ندادند. در این پژوهش مدل بروکس و کوری دقت کمی در برازش از خود نشان داد زیرا هر اندازه منافذ خاک یکنواخت‌تر باشند، مقدار پارامتر  $\lambda$  که نشان‌دهنده توزیع اندازه منافذ است، بزرگتر شده و با افزایش

جدول ۳- دقت برازش مدل‌ها برای برآورد SWRC در کلاس بافت رسی و لوم رسی

مدل	بافت رسی			بافت لوم رسی		
	RMSE	Akaike	$R^2$	RMSE	Akaike	$R^2$
بروکس، کوری	۰/۰۳۵۳	-۳۱۴	۰/۹۲	۰/۰۳۰۹	-۷۱۶	۰/۹۲
کمپل	۰/۰۲۷۵	-۳۴۰	۰/۹۵	۰/۰۲۴۳	-۷۶۸	۰/۹۵
درایزن	۰/۰۲۶۴	-۳۴۶	۰/۹۵	۰/۰۲۴۲	-۷۶۹	۰/۹۵
نمای (B.L)	۰/۰۴۵۸	-۲۹۲	۰/۸۷	۰/۰۳۷۴	-۶۷۹	۰/۸۹
فارل ولارسون	۰/۰۲۲۴	-۳۵۷	۰/۹۶	۰/۰۱۹۷	-۸۰۹	۰/۹۶
لیباردی و همکاران	۰/۰۱۹۴	-۳۷۳	۰/۹۷	۰/۰۱۶۷	-۸۴۶	۰/۹۸
توانی (B.L)	۰/۰۶۰۱	-۲۶۶	۰/۸۳	۰/۰۴۶۱	-۶۳۴	۰/۸۸
روگوسکی	۰/۰۵۲۰	-۲۷۶	۰/۸۸	۰/۰۴۲۵	-۶۵۰	۰/۸۹
سایمونز و همکاران	۰/۰۱۸۶	-۳۷۶	۰/۹۷	۰/۰۱۴۹	-۸۶۶	۰/۹۸
ون گنوختن	۰/۰۲۸۹	-۳۳۱	۰/۹۵	۰/۰۲۵۵	-۷۵۴	۰/۹۵

جدول ۴- دقت برازش مدل‌ها برای برآورد SWRC در کلاس بافت لوم و رسی سیلتی

مدل	بافت لوم			بافت رسی سیلتی		
	R <sup>2</sup>	Akaike	RMSE	R <sup>2</sup>	Akaike	RMSE
بروکس، کوری	۰/۹۳	-۳۳۳	۰/۰۲۹۱	۰/۹۳	-۵۴۸	۰/۰۴۲۷
کمپل	۰/۹۶	-۳۶۶	۰/۰۲۱۱	۰/۹۵	-۵۸۲	۰/۰۳۵۶
درایزن	۰/۹۶	-۳۴۸	۰/۰۲۵۸	۰/۹۳	-۵۳۸	۰/۰۴۶۲
نمایی (B.L)	۰/۹۲	-۳۲۹	۰/۰۳۱۸	۰/۸۴	-۴۷۹	۰/۰۶۴۳
فارل ولارسون	۰/۹۸	-۳۹۳	۰/۰۱۵۴	۰/۹۶	-۵۹۲	۰/۰۳۳۱
لیباردی و همکاران	۰/۹۸	-۴۰۵	۰/۰۱۳۹	۰/۹۶	-۶۰۷	۰/۰۳۰۹
توانی (B.L)	۰/۹۲	-۳۰۸	۰/۰۳۷۲	۰/۷۸	-۴۲۴	۰/۰۸۸۱
روگوسکی	۰/۹۵	-۳۴۰	۰/۰۲۶۸	۰/۸۴	-۴۴۲	۰/۰۷۸۱
سایمونز و همکاران	۰/۹۸	-۴۰۷	۰/۰۱۳۶	۰/۹۶	-۶۰۸	۰/۰۳۰۷
ون گنوختن	۰/۹۵	-۳۴۲	۰/۰۲۵۶	۰/۹۷	-۶۱۰	۰/۰۲۹۷

جدول ۵- دقت برازش مدل‌ها برای برآورد SWRC در کلاس بافت لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی

مدل	بافت لوم رسی سیلتی			بافت سیلتی لوم		
	R <sup>2</sup>	Akaike	RMSE	R <sup>2</sup>	Akaike	RMSE
بروکس، کوری	۰/۹۲	-۱۰۶۳	۰/۰۳۵۲	۰/۹۲	-۸۶۳	۰/۰۴۰۷
کمپل	۰/۹۵	-۱۱۳۹	۰/۰۲۸۰	۰/۹۵	-۹۱۴	۰/۰۳۴۱
درایزن	۰/۹۴	-۱۱۰۱	۰/۰۱۳۷	۰/۹۳	-۸۹۰	۰/۰۳۷۴
نمایی (B.L)	۰/۸۷	-۹۴۸	۰/۰۵۰۴	۰/۸۸	-۷۴۸	۰/۰۶۱۳
فارل ولارسون	۰/۹۷	-۱۲۰۳	۰/۰۲۲۸	۰/۹۷	-۹۷۲	۰/۰۲۷۳
لیباردی و همکاران	۰/۹۸	-۱۲۶۷	۰/۰۱۸۸	۰/۹۷	-۱۰۱۷	۰/۰۲۳۴
توانی (B.L)	۰/۸۱	-۸۸۰	۰/۰۶۲۳	۰/۸۲	-۷۰۶	۰/۰۷۰۴
روگوسکی	۰/۸۵	-۸۸۹	۰/۰۶۰۷	۰/۸۵	-۷۳۵	۰/۰۶۵۴
سایمونز و همکاران	۰/۹۸	-۱۲۸۰	۰/۰۱۸۰	۰/۹۷	-۱۰۲۴	۰/۰۲۲۷
ون گنوختن	۰/۹۶	-۱۱۶۳	۰/۰۲۵۶	۰/۹۶	-۹۳۲	۰/۰۳۱۴

باشد که با نتایج حاصل از پژوهش انجام شده توسط نبی-زاده و بیگی هرچگانی (۱۳۹۰) هماهنگی دارد. دقت در برازش ضعیف مدل بروکس-کوری در خاک‌های سنگین بافت و بافت متوسط با نتایج گیمنز و همکاران (۲۰۰۱) و نبی‌زاده و بیگی هرچگانی (۱۳۹۰) یکسان است. تقریباً در همه طبقه‌های بافتی خاک، مدل سایمونز و همکاران از دقت بالایی برخوردار بودند و به دنبال آن مدل‌های لیباردی و همکاران و سپس فارل و لارسون بالاترین دقت از نظر پارامترهای آماری را دارند و تفاوت میان این مدل‌ها در هیچ کلاس بافتی معنی‌دار نبود. تغییرات برآورد رطوبت توسط مدل‌های منحنی رطوبتی در طبقه بافت سنگین نسبت به بافت متوسط تا حدودی بیشتر شده

در مطالعه پاتیل و همکاران (۲۰۱۲) در نمونه خاک‌های رسی مدل کمپل، ون گنوختن و بروکس و کوری به ترتیب دارای بالاترین RMSE بودند که با نتایج این مطالعه هماهنگی دارد. مدل ون گنوختن در رطوبت‌های بالا دقت بیشتری در برازش بر داده‌های تجربی نسبت به رطوبت کم نشان داد. راس و همکاران (۱۹۹۱) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند. در تمامی طبقه‌های بافت خاک، مدل توانی بروس-لاکسمور میزان رطوبت نزدیک نقطه اشباع را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده و ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. به همین دلیل، ضعیف‌ترین مدل برای همه کلاس‌های بافت انتخاب می‌شود. برازش مدل کمپل در همه کلاس‌های بافت از مدل بروکس-کوری بهتر می-

این سه مدل، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مدل سایمونز و همکاران نسبت به مدل‌های دیگر در تکرارهای بیشتری به جواب رسید. مدل‌های توانی بروس-لاکسمور، روگوسکی و نمایی بروس-لاکسمور در همه کلاس‌های بافتی دقت پایینی داشتند و تفاوت آنها با سایر مدل‌ها معنی دار بود. همچنین، مدل کمپل از نظر دقت نتایجی در سطح متوسط نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه نمود. مدل ون‌گونختن نسبت به مدل بروکس-کوری نتایج دقیق‌تری را نشان داد و از نظر مقایسه میانگین، تفاوت معنی‌داری دارد. مدل ون‌گونختن در خاک‌های رسی سیلتی دقت بالایی نشان داد. با توجه به برتری دو مدل-های سایمونز و همکاران و لیباردی و همکاران در میان ده مدل ذکر شده، کاربرد این دو مدل برای خاک‌های شهرستان لاهیجان پیشنهاد می‌شوند.

است. این موضوع نشان‌دهنده عملکرد بهتر همه‌ی مدل-های منحنی رطوبتی در کلاس بافت متوسط است که با یافته‌های نبی‌زاده و هرچگانی (۱۳۹۰) هماهنگی دارد.

### نتیجه‌گیری

بیشتر مدل‌های مطالعه شده دارای دقت مناسب بوده و عملکرد قابل قبولی برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبت آب خاک در منطقه لاهیجان داشتند. مدل‌های سایمونز و همکاران، لیباردی و همکاران و فارل و لارسون دارای دقت بالا و نتایج نزدیک به هم در همه بافت‌های این منطقه بودند. از میان این سه مدل، مدل سایمونز دقت بیشتری در شبیه‌سازی نسبت به دو مدل دیگر داشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین

### فهرست منابع

۱. ابول‌پور، ب. ۱۳۷۷. تخمین منحنی مشخصه رطوبتی آب خاک و ضرایب هیدرولیکی خاک از روی دانه‌بندی. مجله علوم کشاورزی ایران، شماره ۲۹. صفحه ۲۰۵-۱۹۵.
۲. افراسیاب، پ. ۱۳۸۰. تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل کمپل در منطقه ورامین. مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۶۱ صفحه ۵۸-۵۳.
۳. بای‌بوردی، م. ۱۳۸۳. فیزیک خاک. چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه تهران. شماره ۱۶۷۲. صفحه ۶۷۱.
۴. ترابی‌فارسانی، ن. و ب. قهرمان. ۱۳۸۶. مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک در ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۱، صفحه ۵۷-۴۵.
۵. دادمهر، ر. و ک. زینال‌زاده. ۱۳۸۵. مقایسه برازش برخی مدل‌های رطوبتی خاک. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۶. قربانی‌دشتکی، ش. و م. همایی. ۱۳۸۲. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۳(۱۲). صفحه ۱۶-۱.
۷. رضایی، ع.، م. نیشابوری و ع.ا. جعفرزاده. ۱۳۸۰. ارزیابی مدل کمپل برای تعیین منحنی خصوصیات آب-خاک. مجله علوم کشاورزی ایران، شماره ۳. صفحه ۵۵۳-۵۳۹.
۸. کشکولی، ح.ع. و ک. زینال‌زاده. ۱۳۸۰. مقایسه قابلیت برازش برخی مدل‌های رطوبتی و کاربرد آنها در تخمین پارامترهای هیدرولیکی غیر اشباع خاک. مجله علوم خاک و آب. ۱۵(۲). صفحه ۲۸۹-۲۷۳.
۹. مؤزن‌زاده، ر.، ب. قهرمان، ف. فتحعلیان و ع.ا. خشنودیزدی. ۱۳۸۷. تاثیر نوع و تعداد متغیرهای ورودی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع. نشریه آب و خاک، شماره ۳. صفحه ۷۰-۵۷.

۱۰. نبی‌زاده، ا. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۹۰. کیفیت برازش چند مدل تجربی منحنی رطوبتی در خاک‌های دشت لردگان. نشریه آب و خاک. شماره ۳ (۲۵). صفحه ۶۴۵-۶۳۴.

11. Botula, Y.D., Cornelis, W. M., Baert, G., and E. Van Ranst. 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R.Congo). *Agricultural Water Management*, 111:1-12.
12. Brooks, R., and A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins, No (3).
13. Bruce, R.R., and R.J. Luxmoore. 1986. Water retention: field methods. Method of soil analysis. Part 1 physical and mineralogical method. 2nd Ed. A. Klute, ASA, Inc. SSSA, Inc. Medison, Wisconsin, 663-686.
14. Campbell, G.S. A. 1974. Simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science Journal*. 117:311-314.
15. Driessen, P.M. 1986. Land use system analysis. Wageningen.
16. Durando-Neto, D., Nielsen, D.R., Hopmnas, J.W., Reichardt, K., and O.O. Santos Bacchi. 2001. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 3.00). *Scientia Agricola*, ISSN 0103-9016.
17. Farrel, D.A., and W.E. Larson. 1972. Modeling the pore structure of porous media. *Water Resources Research*, 8:699-706.
18. Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from water table. *Soil Science Journal*, 85: 228-232.
19. Gimenz, D., WJ., Rawls, Y., Pachepsky, and JPC. Watt. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Science Journal*, 166: 79-88.
20. Kern, JS. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society American Journal*, 59: 1134-1141.
21. Libardi, P.L., K., Reichardet., and V. F. Nascimento-Filho. 1979. Análise da redistribuicao da agua visando a condutividade hidraulica do solo. *Energia Nuclear & Agricultura*, 1:108-122.
22. Manyame, C., C.L., Morgan, J .L., Heilman, D., Fatondji, B., Gerad, and W.A. Payne. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141: 407-415.
23. McBratney A.B., B., Minasny, S.R., Cattle, and R.W. Vervoot. 2002. From Pedotransfer to soil inference systems. *Geoderma*, 109: 41-73.
24. Merdun, H. 2010. Alternative Methods in the Development of Pedotransfer Functions for Soil Hydraulic Characteristics. *Eurasian Soil Science*, 1: 62-71.
25. Nemes, A. and W. Rawls. 2006. Evaluation of different representations of the particle size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132: 47-58.
26. Patil N.G., D.K., Pal, C., Mandal, and D.K. Mandal. 2012. Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural network approach to estimate AWC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138: 1-10.
27. Rajkaiv, K., S. Kabos, and M.Th. van Genuchten. 2004. Estimating the water retention curve from Soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil Tillage Research*, 79:145-152.
28. Romano, N., and FB. Chirico. 2004. The role of terrain analysis in using and developing pedotransfer functions. Pp. 273-290. In: Pachepsky Ya, Rawls WJ. (eds), *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Elsevier, Boston, Heidelberg, London.
29. Rogowski, A.S. 1971. Watershed physics: model of soil moisture characteristics. *Water Resources Research*, 7:1575-1582.

30. Ross, P.J., J., Williams, and K.L. Bristow. 1991. Equations for extending water retention curves to dryness. *Soil Science Society American Journal*, 55: 923-927.
31. Saxton, K. E., W. J., Rawls, J. S. Romberger and R.I. papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1031-1036.
32. Sepaskhah, A. R. and Bondar, H. 2002. Estimating Van Genuchten soil water retention curve from some soil physical properties. *Iran Agricultural Journal*, 21:105-118.
33. Simmons, C.S., D.R., Nielsen, and J.W. Biggar. 1979. Scaling of field-measured soil water properties. *Hilgardia*, 47: 77-173.
34. Tomasella, J., and M.G. Hodnett. 1998. Estimating soil water retention characteristic from limited data in Brazilian Amazonian. *Soil Science*, 163: 190-202.
35. Van Genukhten, M.T. A. 1980. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
36. Visser, W.C. 1966. Progress in the knowledge about the effect of soil moisture content on plant production. Wageningen: Institute for Land and Water Management Research. (Technical Bulletin, 45).

Archive of SID