

بررسی مدل‌های برآورد منحنی مشخصه رطوبتی (SWCC)

منصوره بایرام، فرزانه حیدری و صبا سقائی



دوره ۱، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۴، صفحات: ۳۵-۵۰

www.jewe.ir

نحوه ارجاع به این مقاله: بایرام م.، حیدری ف. و سقائی ص. (۱۳۹۴). بررسی مدل‌های برآورد منحنی مشخصه رطوبتی (SWCC)، محیط‌زیست و مهندسی آب. شماره ۱، شماره ۱، صفحات: ۳۵-۵۰.

How to cite this paper: Bayram M., Heidari F. and Saghaei S. (2015). Assessing the soil water characteristic curve (SWCC) models. J. Environ. Water Eng. 1(1), 35-50.

بررسی مدل‌های برآورد منحنی مشخصه رطوبتی (SWCC)

منصوره بایرام^{*}، فرزانه حیدری^۱ و صبا سقائی^۱

۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: mansure.bayram@gmail.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۰۷/۱۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۰۹/۰۷]

چکیده

بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک همچون نقطه پژمردگی و ظرفیت زراعی برای مطالعه و مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک لازم است. به دلیل تغییرات زمانی و مکانی این ویژگی‌ها، روش‌های غیرمستقیم در تخمین آن‌ها توسعه داده شده است. در این پژوهش از ۱۰ مدل مختلف به منظور انتخاب بهترین مدل برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی (SWCC) در خاک‌های رسی، لوم رسی و لوم شنی استفاده شد. بدین منظور ابتدا SWCC خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به دست آمد. سپس مدل‌های مختلف بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. هدایت هیدرولیکی اشباع نیز در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که تمام مدل‌ها به جز مدل‌های کمپل و روسو عملکرد مناسبی در تخمین SWCC داشتند و از بین مدل‌های SWCC، مدل نمایی دوگانه در خاک‌های رسی، لوم رسی، لوم شنی با مقادیر SSR به ترتیب 5×10^{-4} ، 2×10^{-4} و 10^{-4} ؛ RMSE به ترتیب cm^3/cm^3 ۰/۰۱۳، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۵؛ R^2 به ترتیب ۰/۹۹۵، ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۸ بهترین عملکرد را نسبت به مدل‌های دیگر ارائه دادند. روش SSCBDTH331500 مدل Rosetta نیز دقت بالایی در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع داشت. نتایج این تحقیق به ارایه روش بهینه در برآورد SWCC کمک خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت، SWCC، هدایت هیدرولیکی، خاک اشباع

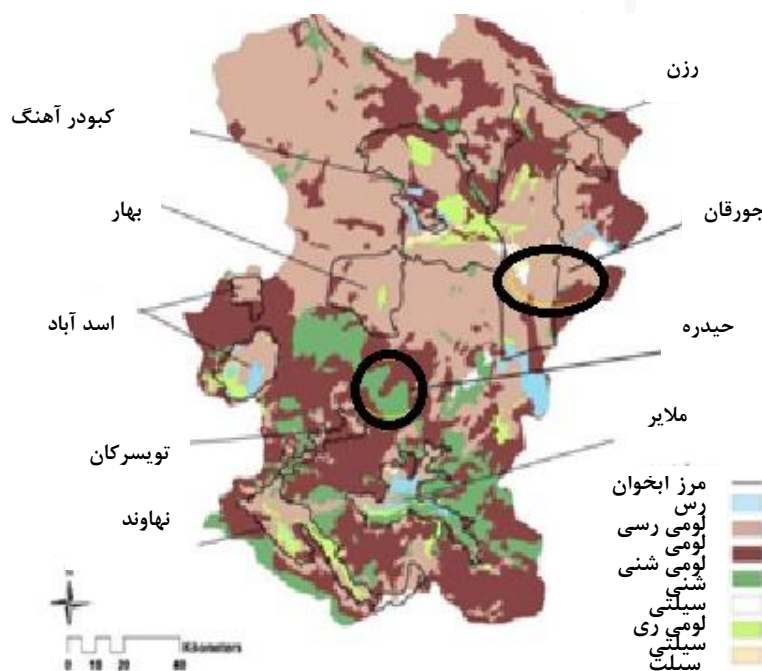
۱- مقدمه

بیان کمی مقدار رطوبت و هدایت آبی خاک برای مطالعه و مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک حائز اهمیت است. از این رو پژوهشگران تلاش‌های زیادی به منظور یافتن شیوه‌های ساده و ارزان جهت شناسایی روابطی منطقی و عملی بین رطوبت خاک و پتانسیل ماتریک انجام داده‌اند (Homaei و Dashtaki-Ghorbani, 2002). این مسئله هنگامی که نقاط رطوبتی مهم مانند نقطه پژمردگی یا ظرفیت زراعی مطرح است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Cavazza et al. 2007)؛ بنابراین، با توجه به اهمیت ویژگی‌های هیدرولیکی همچون نقطه پژمردگی و ظرفیت زراعی و نقش آن‌ها در حل مسائل مدیریتی آب‌و خاک، اندازه‌گیری و تعیین آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی پدیده‌های مرتبط با آب‌و خاک دارای پیچیدگی‌هایی هستند که مدل‌های ریاضی ارائه‌شده قادر به شبیه‌سازی دقیق آن‌ها نمی‌باشند. آگاهی از این روابط در مسائل مختلف آبیاری و زهکشی، برای تعیین نیاز آبی گیاهان و تعیین مقدار آب موجود در خاک بسیار اهمیت دارد. SWCC و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از جمله عوامل مهم در بررسی حرکت آب در خاک هستند (Zahrabi et al. 2008). از آنجایی که هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع نشان‌دهنده توانایی ذاتی خاک برای انتقال آب هستند، برآورد آن‌ها برای مدل‌سازی حرکت آب در خاک ضروری است (Foley et al. 2006). تخمین مشخصات خاک‌های اشباع و غیراشباع به منظور بررسی رفتار این‌گونه خاک‌ها مستلزم انجام آزمایش‌های نسبتاً وقت‌گیر و هزینه‌بر است و SWCC در تخمین رفتار این خاک‌ها اهمیت و کاربردی ویژه دارد (Wosten et al. 2001; Pish Pashang et al. 2006). SWCC رابطه مقدار رطوبت و مکش خاک را نشان می‌دهد که برای شرح رفتار خاک‌های اشباع و غیراشباع اهمیت و کاربرد دارد (Jianlin و Jian, 2005). SWCC به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی، ذخیره‌سازی آب خاک، ظرفیت مزرعه و رطوبت خاک در فعالیت‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Brady و Weil, 1999). به گزارش بسیاری از محققین، دقت توابع انتقالی موجود در برآورد رطوبت قابل‌استفاده کمتر از حالتی است که جهت برآورد رطوبت در یک مکش مشخص به کار می‌رود (Khodaverdiloo et al. 2001). Too et al. (2014) در پژوهشی به بررسی ۱۰ مدل از جمله نمایی دوگانه (Omuto, 2009)، نمایی (Omuto, 2007) و Gardner (1956) در تخمین SWCC پرداختند. آن‌ها بیان کردند که مدل Gardner (1956) در بین مدل‌های چهار پارامتری و مدل نمایی در مدل‌های سه پارامتری و مدل نمایی دوگانه در مدل‌های پنج پارامتری بهترین عملکرد را ارائه دادند. Fredlund et al. (2011) به تخمین مکش از SWCC به‌وسیله مدل‌های Gardner (1956)، Van Genuchten (1980)، Brooks و Corey (1964) پرداختند و دریافتند همه مدل‌ها برازش مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه دادند. Leong و Rahardjo (1997)، Nam et al. (2009) و Fredlund et al. (2011) نشان دادند که مدل منحنی رطوبتی Fredlund و Xing (1994) از دقت بالایی در توصیف منحنی رطوبتی خاک برخوردار است. Cornelis et al. (2005) در پژوهشی بیان کردند که مدل Van Genuchten (1980) بهترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه دادند. Borgesen و Schaap (2005) بیان کردند پیش‌بینی بهتر توسط مدل Rosetta می‌تواند به دلیل وجود ماهیت علمی قوی استفاده‌شده در این مدل و محدوده وسیع نمونه خاک‌های استفاده‌شده در آموزش مدل باشد. علاوه بر آن، چون در آموزش شبکه عصبی مصنوعی Rosetta از خاک‌های قاره آسیا نیز استفاده‌شده است می‌توان عملکرد بهتر Rosetta را به این موضوع نیز نسبت داد. به‌کارگیری تابعی گویا و دقیق در برآورد آب قابل‌استفاده و نیز مقایسه و ارزیابی این تابع با سایر توابع موجود ضروری به نظر می‌رسد (Zolfaghari et al. 2013). در این پژوهش با استفاده از آنالیز نمونه‌های صحرایی جمع‌آوری‌شده، ضمن تعیین منحنی رطوبتی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، از این داده‌ها برای بررسی ۱۰ مدل متداول در تخمین SWCC و انتخاب مدل‌های با بیش‌ترین دقت استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش منطقه جورقان (۵ کیلومتری جاده تهران) و منطقه حیدره از توابع بخش مرکزی شهرستان همدان است. جورقان شهری است که با مساحت 1256374 m^2 در ارتفاع 1740 m از سطح دریا قرار گرفته است و در عرض جغرافیایی $34^{\circ}53'00''$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ}33'00''$ شرقی قرار دارد. حیدره روستایی در دهستان الوند کوه غربی است و در عرض جغرافیایی $34^{\circ}48'09''$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ}27'27''$ شرقی قرار دارد. آب‌وهوای استان، تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع، مکان، امتداد کوه‌ها و فاصله از دریاست. به‌طور کلی آب‌وهوای استان همدان در نتیجه وجود کوه‌های مرتفع، رودخانه‌ها و پستی‌وبلندی‌های زیاد، به‌شدت متغیر است. زمستان‌های این استان سرد، پربرف و باران و در تابستان‌ها دما معتدل است. شکل (۱) پراکندگی خاک‌های استان همدان از نظر بافت را نشان می‌دهد. مناطق مورد مطالعه نیز در شکل (۱) مشخص شده است.



شکل ۱- پراکندگی خاک‌های استان همدان از نظر بافت (Ghaemizadeh et al. 2014) و مناطق مورد مطالعه

۲-۲- نمونه برداری خاک

با توجه به بافت غالب مناطق استان همدان، سه نوع بافت خاک شامل بافت رسی، لوم رسی و لوم شنی انتخاب گردید و بر اساس تحقیقات قبلی صورت گرفته توسط مرکز تحقیقات کشاورزی استان همدان (Anonymous, 2011)، خاک‌های دارای بافت سنگین از منطقه اطراف جاده جورقان (۵ کیلومتری جاده تهران) و خاک دارای بافت سبک از منطقه حیدره همدان تهیه شد. تهیه نمونه دست‌نخورده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری به‌وسیله سیلندر صورت گرفت و سپس برای حفظ رطوبت و جلوگیری از ریزش

خاک، سیلندر در داخل نایلون پلاستیکی قرار داده شد و به آزمایشگاه منتقل گردید. درصد ذرات اولیه (شن، سیلت، رس) به روش هیدرومتری بر پایه قانون استوکس اندازه‌گیری و طبق استاندارد (ASTM D(422 آنالیز گردید. بافت خاک با استفاده از نرم‌افزار TAL4.2 تحت ویندوز که بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا و مثلث بافت خاک (USDA) تهیه شده است، تعیین گردید (ASTM, 2003). مشخصات بافت خاک‌های مورد مطالعه در بخش نتایج ارائه گردید.

۲-۳- جرم مخصوص ظاهری

جرم مخصوص ظاهری برابر با جرم دانه‌های خاک خشک به حجم کل خاک است و به روش سیلندر بر اساس استاندارد - ASTM D(3385-03 اندازه‌گیری گردید. در این روش ابتدا ابعاد و وزن یک سیلندر نمونه‌برداری تعیین و با استفاده از آن نمونه دست‌نخورده برداشت شد. نمونه به آزمایشگاه منتقل گردید و به مدت ۲۴ ساعت در آون تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از خشک شدن وزن شد. جرم مخصوص ظاهری از رابطه (۱) به دست آمد.

$$\rho_b = M_s / V_t \quad (1)$$

که در آن ρ_b جرم مخصوص ظاهری به کیلوگرم به مترمکعب، M_s وزن خاک خشک به کیلوگرم و V_t حجم کل خاک به مترمکعب است. جرم مخصوص ظاهری در خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

خاک	ρ_b (kg/m ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)
رسی	۱/۱	۰/۰۲۲	۰/۷۵۹
لوم رسی	۱/۲۲	۰/۰۱۷	۰/۵۴۴
لوم شنی	۱/۵۱	۰/۰۱۱	۰/۴۳

۲-۴- آزمایش صفحات فشاری

بر اساس پژوهش Lin و Cerato (2012) و روش پیشنهادی آن‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. این نمونه‌ها هم‌چنین به مدت ۲۴ ساعت تحت مکش قرار گرفته و میزان رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳ kpa، -۱۰۰، -۳۰۰، -۵۰۰ - ۱۰۰۰- توسط دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به‌منظور تعیین رطوبت اشباع (θ_s) و رطوبت باقی‌مانده (θ_r) از روش پیشنهادی Miller et al. (2002) استفاده گردید و برای تعیین مقدار θ_s ، نمونه‌های اشباع وزن و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. بعد از خشک شدن، این نمونه‌ها مجدداً وزن شدند و θ_s از رابطه (۲) محاسبه شد. برای تعیین مقدار θ_r ، نمونه‌ها بعد از وزن نمودن اولیه در آزمایشگاه در شرایط دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۵ درصد به مدت سه هفته نگاه‌داشته شدند. سپس θ_r از رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$\theta = \rho_b \left(\frac{\theta_w}{\theta_s} \right) \quad (2)$$

که در آن: θ رطوبت در نقطه مورد نظر، ρ_b جرم مخصوص ظاهری، θ_w رطوبت موجود در خاک، θ_s رطوبت خاک خشک است.

۲-۴- مدل های مورد استفاده

در پژوهش حاضر عملکرد تعدادی از مدل های ۳ پارامتری، ۴ پارامتری و ۵ پارامتری در تخمین SWCC مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات و پارامترهای مدل های کاربردی در تخمین SWCC مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مدل های برآورد SWCC مورد استفاده در این تحقیق

پارامترها	روابط	سال	مدل
مدل های سه پارامتری			
$\lambda, \alpha, \theta_s$	$\theta(h) = \theta_s (\alpha h)^2$	۱۹۷۴	Campbell
$\alpha, \theta_s, \theta_r$	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h) e^{-\alpha h}]$	۱۹۸۲	Tani
$\alpha, \theta_s, \theta_r$	$\theta(h) = (\theta_r + \theta_s) e^{-\alpha h}$	Omuto,) (2007	نمایی
مدل های چهار پارامتری			
$\alpha, n, \theta_s, \theta_r$	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-1}$	۱۹۵۶	Gardner
$\alpha, n, \theta_s, \theta_r$	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + 0.5 \alpha h] e^{0.5 \alpha h}]^{2/(2+n)}$	۱۹۸۸	Russo
$\lambda, \psi_a, \theta_s, \theta_r$	$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_a}{h}\right)^\lambda$	۱۹۶۴	Corey و Brooks
$h_m, \psi_a, \theta_s, \theta_r$	$\theta(h) = \theta_r + \frac{1}{2} (\theta_s - \theta_r) \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma \sqrt{2}} \right]$	۱۹۹۹	Kosugi
مدل های پنج پارامتری			
$c, b, a, \theta_s, \theta_r$	$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{h}{a}\right)^b \right] \right]^c}$	۱۹۹۴	Fredlund و Xing
$m, \alpha, n, \theta_s, \theta_r$	$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[e + \left(\frac{h}{\alpha}\right)^n \right]^m}$	۱۹۸۰	Van Genuchten
$\alpha_1, \theta_{s2}, \theta_r, \theta_{s1}, \theta_r, \alpha_2$	$\theta(h) = \theta_r + \theta_{s1} e^{-\alpha_1 h} + \theta_{s2} e^{-\alpha_2 h}$	Omuto,) (2009	نمایی دوگانه

در جدول (۲) θ_r = رطوبت باقی مانده (cm^3/cm^3)، θ_s = رطوبت اشباع (cm^3/cm^3)، ψ = پتانسیل ماتریک (cm)، α = معکوس پتانسیل ورود هوا، λ = شاخص توزیع اندازه منافذ و ψ_a پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا (cm) است. n در مدل Gardner (1956)، پارامتر تجربی و در مدل Russo (۱۹۸۸)، شاخص توزیع اندازه منافذ است. h_m مکش میانه و σ انحراف معیار توزیع مکش است. در مدل Van Genuchten (1980): α, n و m پارامترهای تجربی اند. در مدل نمایی دوگانه، α_1 و α_2 به ترتیب معکوس مکش ورود هوا در ساختمانی و منافذ بافتی خاک و θ_{s1} و θ_{s2} به ترتیب مقدار رطوبت اشباع در منافذ ساختمانی و بافتی است.

برای برآزش مدل ها از ابزار solver در نرم افزار صفحه گسترده MS-Excel استفاده گردید. روال بهینه سازی مناسب مدل های برآزشی بر داده های اندازه گیری شده با تغییر مکرر در پارامترهای مدل بر اساس کاهش حداقل مربع خطا (SSR) بین داده های پیش بینی شده و اندازه گیری شده انجام شد. SSR به صورت معادله (۳) تعریف می گردد:

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\theta_{wi} - \theta_{ci})^2 \quad (3)$$

که در آن w_i عامل وزن، θ_{wi} و θ_{ci} به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده به‌وسیله مدل در سطح فشار معین است. عامل وزن برای تمام داده‌ها برابر با یک است (Leong و Rahardjo 1997). اگر SSR کم‌تر از 10^{-3} باشد مدل ارائه مناسب و نتایج قابل قبولی برای داده‌های تجربی دارد (Leong و Rahardjo 1997, Zhai و Rahardjo 2012). پس از برازش مدل‌های SWCC در خاک‌های مورد مطالعه و بهینه‌سازی به‌وسیله SSR، پارامترهای ثابت حاصل از بهترین برازش مدل‌ها با داده‌های تجربی در جدول (۳) ارائه گردید.

جدول ۳- پارامترهای ثابت حاصل از بهترین برازش مدل‌های SWCC

مدل	خاک/ پارامترها	رسی	لوم رسی	لوم شنی	مدل	خاک/ پارامترها	رسی	لوم رسی	لوم شنی
Campbell (۱۹۷۴)	Tani (۱۹۸۲)	α	۲/۴۴	۲/۳۳	۲/۳	α	۲/۴۴	۲/۳۳	۲/۳
		λ	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	θ_r	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶
		θ_s	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۳	θ_s	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۳
نمایی (Omuto, 2007)	Gardner (۱۹۵۶)	α	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲	α	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲
		θ_r	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۲	θ_r	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۲
		θ_s	۰/۵۶	۰/۲۹	۰/۲۶	θ_s	۰/۵۶	۰/۲۹	۰/۲۶
		θ_s	۰/۷۶	۰/۱۷	۰/۱۱	θ_s	۰/۷۶	۰/۱۷	۰/۱۱
Russo (۱۹۸۸)	Brooks و Corey (۱۹۶۴)	α	.	.	.	α	.	.	.
		n	۴/۴۸	۴/۳۵	۳/۱۰	n	۴/۴۸	۴/۳۵	۳/۱۰
		θ_r	۱۳۹۹/۷	۹۵۸/۹	۶۹۸/۶	θ_r	۱۳۹۹/۷	۹۵۸/۹	۶۹۸/۶
		θ_s	۰/۷	۰/۴	۰/۳۶	θ_s	۰/۷	۰/۴	۰/۳۶
Kosugi (۱۹۹۹)	Fredlund و Xing (۱۹۹۴)	σ	۲/۵	۲/۱۳	۳/۵	σ	۲/۵	۲/۱۳	۳/۵
		h_m	۸/۷	۱/۵	۱/۳	h_m	۸/۷	۱/۵	۱/۳
		θ_r	.	۰/۱۷	.	θ_r	.	۰/۱۷	.
		θ_s	۰/۷۹	۰/۵۶	۰/۴۸	θ_s	۰/۷۹	۰/۵۶	۰/۴۸
		θ_s	۰/۷۶	۰/۱۷	۲×۱۰ ^{-۲}	θ_s	۰/۷۶	۰/۱۷	۲×۱۰ ^{-۲}
Van Genuchten (۱۹۸۰)	نمایی دوگانه (Omuto, 2009)	$\alpha (kpa \times 10^{-2})$	۱/۱۵	۲/۲۴	۳/۰۸	$\alpha (kpa \times 10^{-2})$	۱/۱۵	۲/۲۴	۳/۰۸
		n	۱/۲۷	۱/۳۷	۱/۲۸	n	۱/۲۷	۱/۳۷	۱/۲۸
		θ_r	.	۰/۰۱۳	.	θ_r	.	۰/۰۱۳	.
		θ_s	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۴۳	θ_s	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۴۳
		m	۰/۲۱۵	۰/۲۷	۰/۲۲	m	۰/۲۱۵	۰/۲۷	۰/۲۲

α_1 در مدل نمایی دوگانه در خاک لوم رسی کم‌ترین مقدار و α_2 در خاک لوم شنی بیش از لوم رسی و رسی است و حاصل جمع آن‌ها $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ رفتارهای همانند α در مدل Van Genuchten (1980) دارد. این مقدار در خاک رسی بیش از خاک لوم رسی و لوم شنی است. α در مدل Gardner در خاک لوم رسی بیش از لوم شنی و در خاک لوم شنی بیش از خاک رسی است و با مقادیر Van Genuchten و مدل نمایی دوگانه متفاوت است. همان‌طور که مقدار α افزایش می‌یابد، مکش ورود هوا (Ψ_a) در مدل Brooks و Corey کاهش می‌یابد که با نتایج Miller et al. (2002) مشابه است. مقدار a در مدل Fredlund و Xing مانند پارامتر α در مدل Van Genuchten در خاک رسی بیش از دو خاک دیگر است. h_m مکش میانه در مدل Kosugi در خاک‌های رسی بیش از دو خاک دیگر به دست آمد. با قبول فرض لوگ-نرمال

بودن توزیع اندازه منافذ، دو خاکی که دارای انحراف معیار توزیع مکش (σ) برابر ولو h_m متفاوت هستند، دارای منافذ دوه‌دو متناسب خواهند بود. در نتیجه این دو خاک می‌توانند متشابه فرض شوند؛ بنابراین، طبق مقادیر σ شرط تشابه هندسی در این سه خاک وجود ندارد و خاک‌های انتخاب شده کاملاً غیرمشابه‌اند.

به منظور ارزیابی کارایی مدل‌های موجود از پارامترهای آماری ریشه دوم مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R^2)، ضریب کارایی (E)، شاخص ویلموت (۱۹۸۲) (d) و حداکثر خطا (ME) که به صورت معادله‌های (۴) تا (۸) محاسبه می‌شوند، ارزیابی گردید.

$$RMSE = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (۵)$$

$$ME = \frac{100}{\bar{m}} \times \max |s_i - m_i| \quad (۶)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (۷)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - m_i| + |m_i - \bar{m}|)^2} \quad (۸)$$

که در آن‌ها m_i مقادیر اندازه‌گیری شده و s_i مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد مشاهدات و \bar{m} میانگین مقادیر m_i است.

۲-۵- هدایت هیدرولیکی اشباع

هدایت هیدرولیکی خاک لوم شنی به روش بار ثابت و خاک لوم رسی و رسی به روش بار افتان صورت گرفت (ASTM D(5084-03). با توجه به تنوع مکانی زیاد خواص هیدرولیکی خاک، اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مزرعه‌ای خواص هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی وقت‌گیر و پرهزینه است (Mohammadi و Vancloost, 2011; Abbasi et al. 2011). از این رو برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از روش Rosseta استفاده گردید. در این روش از پنج سطح متفاوت از ورودی‌ها از جمله: TC (بافت خاک)، SSC (میزان شن، سیلت و رس)، SSCBD (میزان شن، سیلت، رس و وزن مخصوص ظاهری)، SSCBDTH33 (میزان شن، سیلت، رس، وزن مخصوص ظاهری و میزان رطوبت در پتانسیل ماتریک ۳۳ کیلو پاسکال) و SSCBDTH331500 (میزان شن، سیلت، رس، وزن مخصوص ظاهری و میزان رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) استفاده گردید. مدل توابع انتقالی Rosetta با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی و مدل فرکتال برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع کاربرد دارد (et al. 2014). Rasoulzadeh). مدل Rosetta قادر است ویژگی‌های رطوبتی و هیدرولیکی خاک را با استفاده از یک سری پارامترهای ساده و زود یافت خاک، از جمله درصد هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک (رس، سیلت و شن)، چگالی ظاهری خاک و حدود رطوبتی PWP و FC به عنوان ورودی، تخمین بزند (Shirani, 2012).

۳- یافته‌ها و بحث

در این پژوهش از خاک‌های رسی، لوم رسی و لوم شنی با درصد رس به ترتیب ۱۳/۷۵، ۲۶/۶۵ و ۷۰/۳۵ استفاده گردید و پراکنش بافت خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه گردید. نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های برازشی برای خاک‌های رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب در جداول (۵) تا (۷) ارائه گردید.

جدول ۴- پراکنش بافت خاک مناطق مورد مطالعه

بافت خاک	رس	سیلت	شن
رسی	۷۰/۳۵	۱۳/۴	۱۶/۲۵
لوم رسی	۲۶/۶۵	۳۲/۲	۴۱/۱۵
لوم شنی	۱۳/۷۵	۲۲/۰۵	۶۴/۲

جدول (۵) تا (۷) نشان می‌دهند که در مدل‌های ۳ پارامتری خاک‌های مورد مطالعه مقدار SSR بیش از 10^{-3} است که نشان‌دهنده نامناسب بودن مدل‌های ۳ پارامتری در تخمین SWCC است. در مدل‌های ۴ پارامتری مقدار SSR در مدل Gardner (8×10^{-4}) در خاک رسی، مدل‌های Brooks و Corey، (9×10^{-5} ، 4×10^{-4}) و Kosugi (2×10^{-4} ، 3×10^{-4}) در خاک لوم رسی و لوم شنی و همچنین در کل مدل‌های ۵ پارامتری کمتر از 10^{-3} است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب و قابل قبول این مدل‌ها در تخمین SWCC است. محدوده SSR با مقدارهای به‌دست‌آمده در مطالعات Leong و Rahardjo (1997) و Miller et al. (2002) هم‌خوانی دارد.

جدول ۵- پارامترهای SSR و ارزیابی کارایی مدل‌های SWCC در خاک رسی

مدل	مدل‌های سه پارامتری		مدل‌های چهار پارامتری				مدل‌های پنج پارامتری		سال	
	Tani	Campbell	Corey	Russo	Gardner	Kosugi	Xing	Van Genuchten		
سال	۱۹۸۲	۱۹۷۴	۱۹۸۸	۱۹۵۶	۱۹۶۴	۱۹۹۹	۱۹۹۴	۱۹۸۰	(۲۰۰۹)	Omuto
SSR	2×10^{-3}	۰/۲	8×10^{-4}	1.14×10^{-4}	2×10^{-3}	5×10^{-3}	8×10^{-4}	8×10^{-4}	5×10^{-4}	
RMSE	۰/۲۷	۰/۲۷۳	۰/۰۶	۰/۰۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	
R^2	۰/۹۹۷	۰/۸	۰/۸۶	۰/۹۹۳	۰/۹۸۲	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۷	
E	۰/۹۸	-۰/۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	
d	۱	۰/۹۳	۰/۹۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
ME	۰/۰۶۴	۰/۲	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱۴	7×10^{-3}	۰/۰۲۵	۰/۰۱	

جدول ۶- پارامترهای SSR و ارزیابی کارایی مدل‌های SWCC در خاک لوم رسی

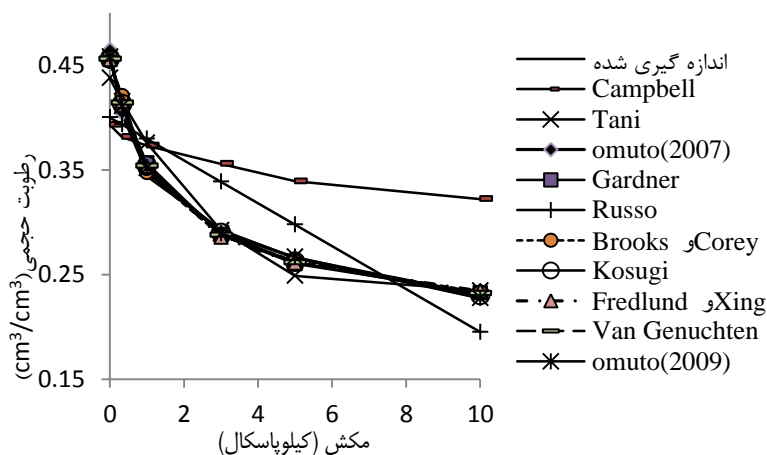
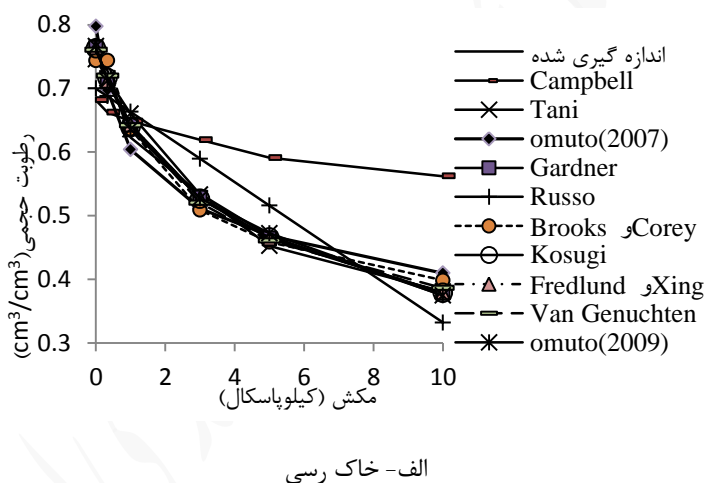
مدل‌های سه پارامتری		مدل‌های چهار پارامتری					مدل‌های پنج پارامتری		مدل	سال
Tani Campbell		Corey Russo Gardner و Xing Kosugi Brooks و Fredlund Van Genuchten					نمایی دوگانه			
سال	۱۹۷۴	۱۹۸۲	۱۹۵۶	۱۹۸۸	۱۹۶۴	۱۹۹۹	۱۹۹۴	۱۹۸۰	(Omuto) (۲۰۰۹)	
SSR	۰/۷	$1/6 \times 10^{-3}$	6×10^{-3}	3×10^{-3}	9×10^{-3}	9×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	
RMSE	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	
R ²	۰/۸	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۹۹	۰/۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۴	۰/۹۹۵	
E	-۰/۸	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۷۵	۱	۰/۹۹۵	۰/۹۹۴	۱	
d	۰/۹۳	۰/۹۹	۱	۱	۰/۹۸	۱	۱	۱	۱	
ME	۰/۲۴	۰/۰۹۵	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲۲	۰/۰۱۶	

جدول ۷- پارامترهای SSR و ارزیابی کارایی مدل‌های SWCC در خاک لوم شنی

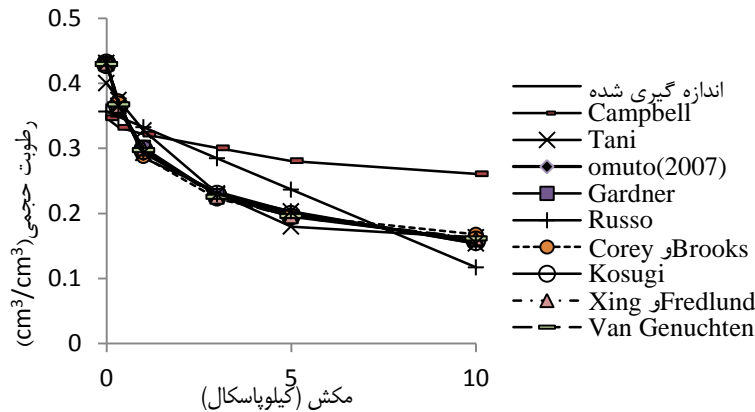
مدل‌های سه پارامتری		مدل‌های چهار پارامتری					مدل‌های پنج پارامتری		مدل	سال
Gardner Campbell		Russo Gardner و Brooks و Corey و Xing Kosugi و Fredlund و Van Genuchten					نمایی دوگانه			
سال	۱۹۷۴	۱۹۸۲	۱۹۵۶	۱۹۸۸	۱۹۶۴	۱۹۹۹	۱۹۹۴	۱۹۸۰	(Omuto) (۲۰۰۹)	
SSR	۰/۰۹	3×10^{-3}	8×10^{-3}	5×10^{-3}	$0/013$	4×10^{-4}	3×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-4}	
RMSE	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱۵	
R ²	۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۸۶	۰/۹۹	۰/۶۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۲	۰/۹۹۸	
E	-۰/۸	۰/۹۵	۱	۰/۹۹	۰/۷۵	۰/۹۹	۱	۰/۹۹۲	۱	
d	۰/۹۳	۰/۹۹	۱	۱	۰/۹۸	۱	۱	۱	۱	
ME	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۱۶	۰/۲۸۸	۰/۰۲۱	۰/۰۵۱	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	۰/۰۱۴	

برای محاسبه خطای پیش‌بینی رطوبت به‌وسیله ۱۰ مدل از RMSE (برحسب cm^3/cm^3) استفاده گردید با توجه به نتایج نشان داده‌شده در جداول (۵) تا (۷) مقادیر RMSE در مدل‌های ۳ پارامتری به‌جز مدل Campbell (1974)، در مدل‌های ۴ پارامتری به‌جز مدل Russo (1988) و در تمام مدل‌های ۵ پارامتری در خاک‌های مورد مطالعه به صفر نزدیک است. این نتایج عملکرد مناسب مدل‌ها را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در مدل‌های ۳ پارامتری محدوده R²: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۸ تا ۰/۹۹۷، ۰/۸ تا ۰/۹۹ و ۰/۷۹ تا ۰/۹۹ و RMSE: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۰۲۷ تا ۰/۰۵۶، ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۹ و ۰/۰۷ تا ۰/۳۹ به دست آمد، در مدل‌های ۴ پارامتری محدوده R²: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۸۶ تا ۰/۹۹۶، ۰/۷ تا ۰/۹۹۸ و ۰/۶۸ تا ۰/۹۹۷ و RMSE: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۱، ۰/۰۹ تا ۰/۰۲ و ۰/۱۲۶ تا ۰/۰۲ است و همچنین در مدل‌های ۵ پارامتری محدوده R²: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۹۹۳ تا ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۴ تا ۰/۹۹۸ و ۰/۹۹۲ تا ۰/۹۹۸ و RMSE: در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۸، ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ به دست آمد. مقادیر E و d مدل‌های برازشی به‌جز مدل

Campbell (1974) نزدیک به یک بود و کارایی بالایی داشتند. مقدار ME نشان می‌دهد که مدل‌های مورد مطالعه به جز مدل Campbell (1974) و مدل Russo (1988) کارکرد مناسبی داشته و چون مثبت بودند به مقدار کمی بیش برآوردی از خود نشان دادند. در مدل‌های ۳ پارامتری مدل Tani (1982) در هر سه خاک به دلیل R^2 ، E و d بزرگ‌تر و SSR و RMSE و ME کوچک‌تر، بهترین عملکرد را داشته است. این در حالی است که مدل Campbell (1974) کم‌ترین دقت را در برآورد SWCC داشته است. در مدل‌های ۴ پارامتری مدل Gardner (1956) در خاک رسی، مدل Corey و Brooks (1964) در خاک لوم رسی و لوم شنی به دلیل R^2 ، E و d بزرگ‌تر و SSR و RMSE و ME کوچک‌تر بهترین عملکرد را داشتند ضمن اینکه مدل Russo (1988) در هر سه خاک ضعیف‌ترین عملکرد را ارائه داد، در مدل‌های ۵ پارامتری، تمامی مدل‌ها عملکرد مناسبی داشتند. به‌طور کلی مدل نمایی دوگانه بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها (۳ پارامتری، ۴ پارامتری و ۵ پارامتری) ارائه داد. بررسی نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها حاکی از متفاوت بودن عملکرد مدل‌های مختلف در برآورد رطوبت بوده است. شکل (۲) مدل‌های برازش شده برای تخمین منحنی رطوبتی در خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



ب- خاک لوم رسی



ج- خاک لوم شنی

شکل ۲- مدل‌های برازشی SWCC در خاک‌های: الف) رسی، ب) لوم رسی و ج) لوم شنی

شکل (۲) نشان می‌دهد که مدل‌های Campbell (1974) و Russo (1988) دقت پایینی در تخمین منحنی رطوبتی دارند و سایر مدل‌ها دقت تقریباً مناسبی در تخمین منحنی رطوبتی ارائه دادند. با توجه به جداول (۱) و (۳) در بخش مواد و روش‌ها می‌توان دریافت مقدار رطوبت باقی‌مانده (θ_r) به‌طور قابل‌توجهی بین مدل‌ها و نوع خاک متنوع است. مقدار θ_r در مدل دوگانه کوچک‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده، در مدل Gardner بسیار بزرگ‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقدار θ_r در مدل Xing و Fredlund و Xing و Fredlund به‌جز در خاک لوم رسی و در مدل Corey و Brooks و در مدل Tinjum et al. (1997) و Leong و Rahardjo (1997) به دست آمد. بهترین مقدار مناسب برای θ_r را بین صفر و ۰/۳۸ دانستند. مقادیر اندازه‌گیری θ_r نشان می‌دهد که توانایی خاک رسی در حفظ رطوبت بیش از سایر خاک‌های مورد مطالعه است و θ_r به دست آمده در تمامی مدل‌ها در این محدوده قرار دارند. به‌طور کلی، ارتباط ضعیفی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده از θ_r وجود دارد. تمامی مدل‌ها به‌جز مدل Kosugi، مقدار رطوبت اشباع (θ_s) را در خاک رسی و لوم شنی برابر مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۷۶ پیش‌بینی کردند. ضمن اینکه در مدل دوگانه مقدار رطوبت اشباع در خاک لوم رسی با مقدار اندازه‌گیری شده متفاوت بود. برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های مورد مطالعه به‌وسیله مدل Rosetta و مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های مورد مطالعه بر حسب (cm/s)

خاک	رسی	لوم رسی	لوم شنی
اندازه‌گیری شده	$4/9 \times 10^{-5}$	$3/4 \times 10^{-4}$	$1/8 \times 10^{-3}$
TC	$1/7 \times 10^{-4}$	$9/4 \times 10^{-5}$	$4/4 \times 10^{-4}$
SSC	$1/8 \times 10^{-4}$	$7/6 \times 10^{-5}$	$3/6 \times 10^{-4}$
SSCBD	$3/6 \times 10^{-4}$	$2/54 \times 10^{-4}$	$3/75 \times 10^{-4}$
SSCBDTH33	$2/65 \times 10^{-5}$	$3/1 \times 10^{-4}$	$7/6 \times 10^{-3}$
SSCBDTH331500	$3/63 \times 10^{-5}$	$3/3 \times 10^{-4}$	$1/68 \times 10^{-3}$

بر اساس اعداد جدول (۸) روش SSCBDTH331500 نسبت به روش‌های دیگر از دقت بالاتری برخوردار است. از این رو می‌توان دریافت که با افزایش پارامترهای ورودی در مدل Rosetta، دقت این مدل افزایش یافته است. همچنین در هر سه خاک تا حدودی کم برآوردی مشاهده گردید که این کم برآوردی در خاک رس کم‌تر از دو نوع خاک دیگر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های صحرایی و آنالیزهای آزمایشگاهی مدل‌های تعیین SWCC خاک بررسی شدند. مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- از بین مدل‌های برازش داده‌شده بر داده‌های تجربی، مدل نمایی دوگانه (Omuto, 2009) در خاک‌ها بهترین عملکرد را ارائه داد.
- ۲- عملکرد مناسب مدل نمایی دوگانه به دلیل دو قسمتی بودن مدل و در نظر گرفتن دو تابع توزیع اندازه منافذ خاک، یکی برای منافذ ساختمانی و دیگری برای بافت خاک است.
- ۳- مدل‌های ۵ پارامتری دقت بالاتری نسبت به مدل‌های ۴ پارامتری و ۳ پارامتری دارند.
- ۴- دقت مدل Campell در مدل‌های ۳ پارامتری و مدل Russo در مدل‌های ۴ پارامتری بسیار کم‌تر از سایر مدل‌ها است.
- ۵- روش SSCBDTH331500 مدل Rosetta در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های این مدل داشت که نشان‌دهنده افزایش دقت مدل Rosetta با افزایش پارامترهای ورودی آن است.

بررسی و شناخت مدل‌های مناسب در تخمین SWCC اهمیت به سزایی در صرفه‌جویی وقت و هزینه، برآورد ذخیره‌سازی آب در خاک، پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی و رطوبت خاک دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند مورد استفاده مهندسين و محققين بخش خاک و آب کشور قرار گیرد. این پژوهش با داده‌های محدودی انجام شد. تکرار پژوهش با داده‌های صحرایی بیشتر و با توزیع مکانی وسیع‌تر می‌تواند مورد توجه دیگر محققین قرار گیرد.

References

- Abbasi Y. B., Ghanbarian Alavijeh B., Liaghat A. M. and Shorafa M. (2011). Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline alkali soils of Iran, *Pedosphere* 21(2), 230-237.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D 422. (1998). Standard test method for particle-size analysis of soils, Annual book of ASTM standard. 546pp.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D3385-03. (2003). Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer, Annual Book of ASTM Standards. 04, 08.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D5084-03. (2003). Standard Test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, ASTM International, West Conshohocken. PA.

- Anonymous. (2011). Reported results from studies of the Hamadan Province Agricultural Research Center, Institute of Soil and Water Research, Tables 3-1 and 3-2, 3-3,3-4, Hamadan, Iran [In Persian].
- Borgesen C. D. and Schaap M. G. (2005). Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils, *Geoderma*. 127(10), 154-167.
- Brady N. C. and Weil R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th Ed.), Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey.
- Brooks R. H. and Corey A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper. No. 3. Fort Collins. USA.
- Campbell G. S. A. (1974). Simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci., J.*, 117(5), 311-314.
- Cavazza L., Patruno A. and Cirillo E. (2007). Field capacity in soils with a yearly oscillating water table, *Biosys. Engin.* 98(4), 364 – 370.
- Cornelis W. M., Khlosi M., Hartmann R., Van Meirvenne M. and DeVos B. (2005). Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve, *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 69(1), 1902–1911.
- Foley J. L., Tolmie P. E, and Silburn D. M. (2006). Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method. *Aust, J. Soil Res*, 44(6), 701–710.
- Fredlund D. G. and Xing A. (1994). Equations for the Soil Water Characteristic Curve. *Canadian Geotech. J.*, 31(8), 521-532.
- Fredlund D. G., Sheng D. and Zaho J. (2011). Estimation of soil suction from the soil water characteristic curve. *Candian Geotech. J.* 48(3), 186–198.
- Gardner W. R. (1956). Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils, In *Highway Research Board Special Report 40 International Symposiums on Physico-Chemical Phenomenon in Soils*. 15(3), 78–87.
- Ghaemizadeh F., Banejad H. and Bahmani O. (2014). Cadmium transport simulation under different soil conditions using the physical non-equilibrium model. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4), 29-44 [In Persian].
- Ghorbani-Dashtaki S. H. and Homaei M. (2002). Prediction of parametric hydraulic function in unsaturated soils using pedotransfer functions, *Agri. Eng. Res. J.* 3 (12), 3-15.
- Jian Z. and Jianlin Y. (2005). Influences affecting the soil-water characteristic curve. *Zhejiang Univ. Sci.*, 6A (8), 797-804
- Khodaverdiloo H., Homae M., Van Genuchten M. T. H. and Ghorbanidashtaki S. H. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol.*, 399(20), 93-99.
- Kosugi K.(1999). General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63(10), 270–277.
- Leong E. C. and Rahardjo H. (1997). Review of soil-water characteristic curve equations. *J. Geotech. Geoenviron.*, 123(12), 1106– 117.

- Lin B. and Cerato A. B. (2012). Investigation on soil–water characteristic curves of untreated and stabilized highly clayey expansive soils. *Geotech. Geo. Eng.*, 30(9), 803–812.
- Miller C. J., Yesiller N., Yaldo K. and Merayyan S. (2002). Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10(2), 733-742.
- Mohammadi M. H. and Vanclooster M. (2011). Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. *VZJ*, 10(2), 594-602.
- Nam S., Gutierrez M., Diplas P., Petrie J., Wayllace A., Lu N. and Munoz J. J. (2009). Comparison of testing techniques and models for establishing the SWC of riverbank soils. *Eng. Geo.*, 110(24), 1-10.
- Omuto C. T. (2007). *HydroMe: Estimation of soil hydraulic parameters from experimental data*, R Comprehensive, Archive Network. USA.
- Omuto C. T. (2009). Biexponential model for water retention characteristics. *Geoderma.*, 149(16), 235-242.
- Pishe-Pashang Y., Mir Mohammad Hoseini S.M. and Ganjian N. (2006). The Proposed Method to Estimate Soil Water Characteristic Curve for Cohesive Soils. *Sharif-J. Sci. Res.*, 33: 77-83. [In Persian].
- Rasoulzadeh A., Ghalehjo G., Razavi S. and Naishabouri M.R. (2014). Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Naqadeh County. *J. Water Res. Agricul.*, 28(3), 613-624 [In Persian].
- Russo D. (1988). Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 24(8), 453–459.
- Shirani H. (2012). Prediction of FC and PWP using neural network and statistical regression in Bardsir-Kerman area. *J. Wat. Soil Sci. Isfahan University of Technology*, 16(59), 141-151 [In Persian].
- Tani M. (1982). The properties of a water-table rise produced by a one-dimensional, vertical, unsaturated flow (in Japanese with English summary). *J. Jpn. For. Soc.*, 64(9), 409–418.
- Tinjum J. M., Benson C. H. and Blotz L. R. (1997). Soil-water characteristic curves for compacted clays. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(11), 1060–1069.
- Too V. K., Omuto C. T., Biamah E. K. and Obiero J. P. (2014). Review of Soil Water Retention Characteristic (SWRC) Models between Saturation and Oven Dryness. *Open J. Modern Hydro.*, 4(1), 173-182.
- Van Genuchten M. T. H. (1980). A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(7), 892-898.
- Wosten J. H. M., Pachepsky Y. A. and Rawls W. J. (2001). Padotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.*, 251(11), 123–150.
- Zahrabi N., Kashkouli H.A. and Sohrab F. (2008). Estimating unsaturated soil hydraulic functions using Retc software, the 2nd National Conference on Irrigation and Drainage Network Management, Ahwaz Chamran University, Iran [In Persian]

-
- Zhai Q. and Rahardjo H. (2012). Determination of soil–water characteristic curve variables, *Computers and Geotech.*, 42(8), 37–43
- Zolfaghari A., Shorafa M., Mohammadi M. H., And Abaspour H. (2013). Estimation fredlund and Zhang soil water characteristic curve parameters using a point Measured. *J. Soil Res. (Soil and Water Sciences)*, 58(1):27-47 [In Persian].

Assessing the Soil Water Characteristic Curve (SWCC) Models

Mansure Bayram^{1*}, Farzane Heidari¹ and Saba Saghaei¹

¹M. Sc, Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamadan, Iran

*Corresponding Author: mansure.bayram@gmail.com

Received: October 8, 2015

Accepted: November 28, 2015

Abstract:

Investigating the soil hydraulic properties such as wilting point and field capacity is very important in studying and modeling water and solute in soil. Due to the spatial and temporal changes of these characteristics, recent studies have led to the development of indirect methods to estimate the soil properties. In this study, 10 models were used in order to estimate the soil water characteristics curve (SWCC) in soils of Clay, Clay loam, and Sandy loam; hence, to choose the best model. For this purpose, first the SWCC for the studied soils was calculated using pressure plate and then, models were fitted to the experimental data. Saturated hydraulic conductivity was measured in the laboratory and it was estimated by Rosetta model. The results showed that except for Campbell and Russo, all models presented the appropriate performance in estimation of SWCC. Moreover, Biexponential model fitted well with the best performance compared with other models in soils of Clay, Clay loam, and Sandy loam with the sum of the squared residuals (SSR) of 5×10^{-4} , 2×10^{-4} , 1×10^{-4} respectively, RMSE: 0.013, 0.015, and 0.015 cm^3/cm^3 respectively and R²: 0.997, 0.995, and 0.998 respectively. SSCBDTH331500 method in Rosetta model predicted the amount of saturated hydraulic conductivity with high accuracy. The results of this research will help to provide the optimum method for estimating SWCC.

Keywords: Soil Water, SWCC, Hydraulic Conductivity, Saturated Soil.