مقایسه کارایی انواع مدلها در تشریح مناطق مختلف منحنی رطوبتی خاک

لیلا اسماعیل‌نژاد [۱]، حسن رمضان‌پور [۲]، جواد سیدمحمدی [۳] و محمود شعبانپور [۲]
۱- دانشجوی دکتری علوم خاک دانشگاه تهران، ۲- دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه گیلان، ۳- دانشجوی دکتری علوم خاک دانشگاه تبریز

چکیده

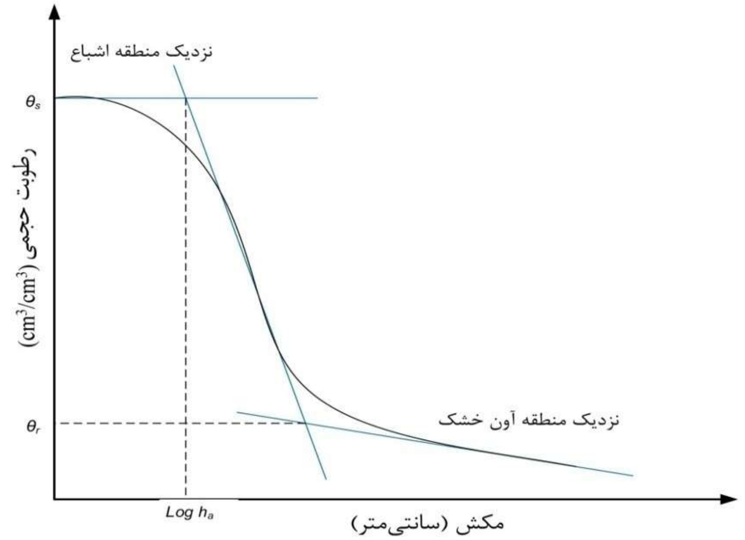
منحنی رطوبتی، ویژگی کلیدی خاک است که در اکثر زمینهها از جمله آبیاری، هیدرولوژی، مهندسی ژئوتکنیک، انتقال املاح و آلاینده‌ها کاربرد دارد. بنابراین تعیین مدلهایی که بتوانند توصیف دقیقی از وضعیت رطوبتی خاک را ارائه دهند، ضروری است. از آنجا که همه خاکها میتوانند طیف وسیعی از رطوبت بین اشباع تا آون خشک را داشته باشند مدلهای موجود باید بتوانند توصیف دقیقی از کل محدوده منحنی رطوبتی ارائه کنند. در این تحقیق، مدلهای مختلف منحنی رطوبتی که معمولاً مورد استفاده قرار میگیرند بر اساس تعداد پارامترهای شکلشان به سه دسته سه، چهار و پنج پارامتری تقسیم شدند. ارزیابی عملکرد آنها بر اساس آمارههای ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد باقیمانده (RSE) جهت انتخاب بهترین مدل در کل محدوده رطوبتی خاک، منطقه آون خشک و اشباع صورت گرفت. نتایج حاصله میتواند به عنوان یک راهنما جهت انتخاب مدل مناسب در برازش منحنی رطوبتی بخصوص در مواردی باشد که محدودیتهایی در اندازهگیری رطوبت خاک برخی نقاط پتانسیلی خاک وجود دارد.

واژههای کلیدی: مدلهای منحنی رطوبتی خاک، منطقه اشباع، منطقه آون خشک.

مقدمه

ویژگیهای رطوبتی خاک، مدیریت حفاظت منابع آب، خاک و محیط زیست را تحت تاثیر قرار میدهند. مقدار آب خاک بوسیله دو نیروی جذب سطحی و موئینگی نگهداری میشوند. جذب سطحی مسئول نگهداری آب بر روی سطح ذرات خاک است در حالیکه نیروی موئینگی رطوبت را در منافذ بین ذرات خاک یا در بین خاکدانهها نگهداری میکند (Marshall et al., ۱۹۹۶). رابطه بین برآیند این نیروها و مقدار رطوبت خاک، ویژگیهای ذخیره رطوبتی خاک نام دارد که در شکل ۱ برای یک نوع خاک نمایش داده شده است. (Omuto and Gumbe, ۲۰۰۹). مدلهای زیادی برای تشریح منحنی رطوبتی خاک توسعه یافتهاند. بسیاری از این مدلها فقط در قسمتی معین از منحنی رطوبتی خاک به عنوان مثال بخش خشک یا مرطوب، بافتی خاص، افقهای معینی از خاک یا در مناطقی خاص از جهان عملکرد موفقی داشتهاند (Khlosi et al., ۲۰۰۸). اغلب مدلهای مورد استفاده دارای پارامترهای شکل هستند که به عنوان پارامترهای هیدرولیکی شناخته میشوند. کاربرد مدلهای ذخیره رطوبتی نیاز به شناخت این پارامترها دارد و معمولاً از برازش توابع مختلف منحنی رطوبتی بر دادههای اندازهگیری شده بدست میآیند (van Genuchten et al., ۱۹۹۱).

مدلهای زیادی در منابع وجود داشته و بسیاری نیز در حال توسعه هستند. بنابراین انتخاب مدل مناسب امری سخت و گیج کننده است. تاکنون در هیچ تحقیق جامعی انتخاب مدل مناسب به خصوص بین منطقه آون خشک و اشباع توصیه نشده است. نکته حائز اهمیت این است که مشکلات تشخیص ویژگیهای رطوبتی هنگامیکه خاک به شرایط رطوبتی آون خشک میرسد، افزایش مییابد و این حالتی است که اغلب در مناطق خشک و نیمه خشک اتفاق میافتد. هدف از این مطالعه مقایسه مدلهای منحنی رطوبتی خاک بین اشباع و آون خشک است تا کارایی آنها جهت استفاده در یک محدوده خاص رطوبتی خاک ارزیابی شود.



شکل ۱- منحنی رطوبتی خاک

مواد و روشها

تعداد ۱۴۰ نمونه از خاکهای استان گیلان که محدوده وسیعی از بافتهای مختلف را در بر میگیرد انتخاب و مقدار رطوبت حجمی در مکشهای مختلف اندازهگیری شد. سپس کارآیی ۱۰ مدل مختلف که بر اساس تعداد پارامترهای برازش شکل گروهبندی و در جدول ۱ ارائه شده است، در تعیین منحنی رطوبتی بررسی شد. کارآیی مدلها در کل محدوده منحنی رطوبتی و همچنین در نزدیکی اشباع و منطقه آون خشک مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱- مدلهای منحنی رطوبتی مقایسه شده در مطالعه

نام	مدل	پارامترهای شکل
کمپل (۱۹۷۴)	$\theta(h) = \theta_s(\alpha h)^{\lambda}$	$\theta_s, \alpha, \lambda$
تانی(۱۹۸۲)	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1 + (\alpha h)e^{-\alpha h}\right]$	$\theta_s, \alpha, \theta_r$
نمایی	$\theta(h) = (\theta_r + \theta_s)e^{-\alpha h}$	$\theta_s, \alpha, \theta_r$
گاردنر(۱۹۵۸)	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha h)^n]^{-1}$	n, $\theta_s, \alpha, \theta_r$
روسو	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[(1 + 0.5\alpha h)e^{0.5\alpha h}\right]^{\frac{2}{n+2}}$	n, $\theta_s, \alpha, \theta_r$
بروکز و کوری (۱۹۶۴)	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\ (\alpha h)^{-\lambda}$	$\lambda, \theta_s, \alpha, \theta_r$
کاسوگی (۱۹۹۹)	$\theta(h) = \theta_r + 1/2(\theta_s - \theta_r)\mathrm{erfc}\left[\frac{\ln\left({}^{h}/_{h_m}\right)}{\sigma\sqrt{2}}\right]$	$h_m, \theta_r, \sigma, \theta_s$
فردلاند و زینگ (۱۹۹۴)	$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{\ln[2.7183 + \alpha h^n]\}^m}$	n,m, $\theta_s, \alpha, \theta_r$
دو نمایی اوموتو (۲۰۰۹)	$\theta(h) = \theta_r + \theta_{s1}e^{-\alpha_1 h} + \theta_{s2}e^{-\alpha_2 h}$	$\theta_r, \theta_{s1}, \theta_{s2}, \alpha_1, \alpha_2$
ونگنوختن (۱۹۸۰)	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha h)^n]^{-m}$	n,m, $\theta_s, \alpha, \theta_r$

همه مدلها بر دادههای اندازهگیری شده برازش داده شدند. بهترین مدل بر اساس کمترین RSE و بیشترین R^2 تعیین شد:

$$R^2 = 1 - [(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2)/(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2)]_{(۱)}$$

$$RSE = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2/(n-2)_{(۲)}$$

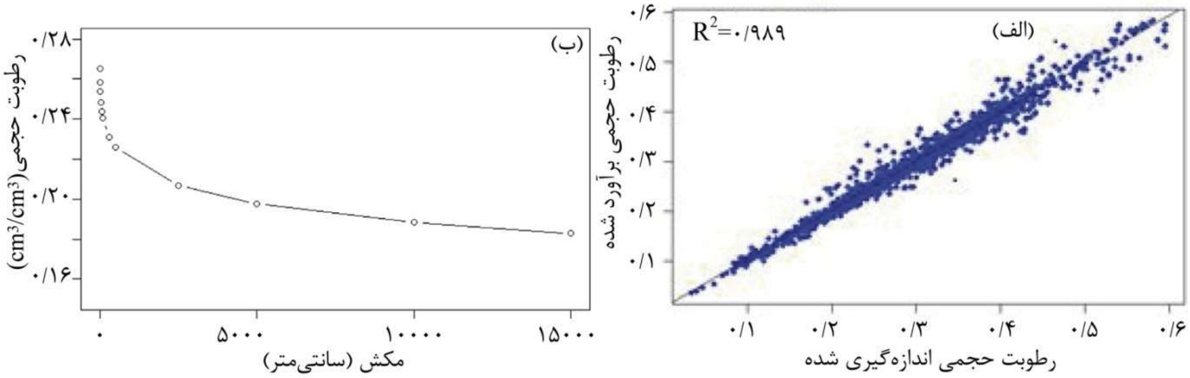
در روابط ۱ و ۲، y_i مقدار اندازهگیری شده، $\bar{y}_i$ میانگین مقدار اندازهگیری شده و $\hat{y}_i$ مقدار پیشبینی شده میباشد.

نتایج و بحث

الف- بین منطقه اشباع و آون خشک: جدول ۲ نشان میدهد که مدل دو نمایی اوموتو (۲۰۰۹) بهترین کارآیی آماری را در بین مدلهای ۵ پارامتری نشان میدهد. مدل گاردنر (۱۹۵۸) بهترین عملکرد آماری در بین مدلهای ۴ پارامتری و مدل نمایی نیز در بین سه پارامتریها داشتهاند. بررسی عملکرد منحنیهای رطوبتی در تمام محدوده منحنی رطوبتی نشان داد که مدل گاردنر (۱۹۵۸) و مدل دو نمایی بیشترین R^2 را داشتهاند (شکل ۲). بطورکلی مدلهای پنج پارامتری منحنی رطوبتی را در کل محدوده آن بهتر از مدلهای دیگر پیشبینی کردهاند. هرچه تعداد پارامترهای شکل بیشتر باشد مدل تمایل بیشتری برای اتصال هرچه نزدیکتر به نقاط عطف و پایانی منحنی رطوبتی داشته و از این طریق به مدل اجازه میدهند که خیلی نزدیک به دادههای اندازهگیری شده عبور کرده و برازش بهتری یابد (Too et al., ۲۰۱۴).

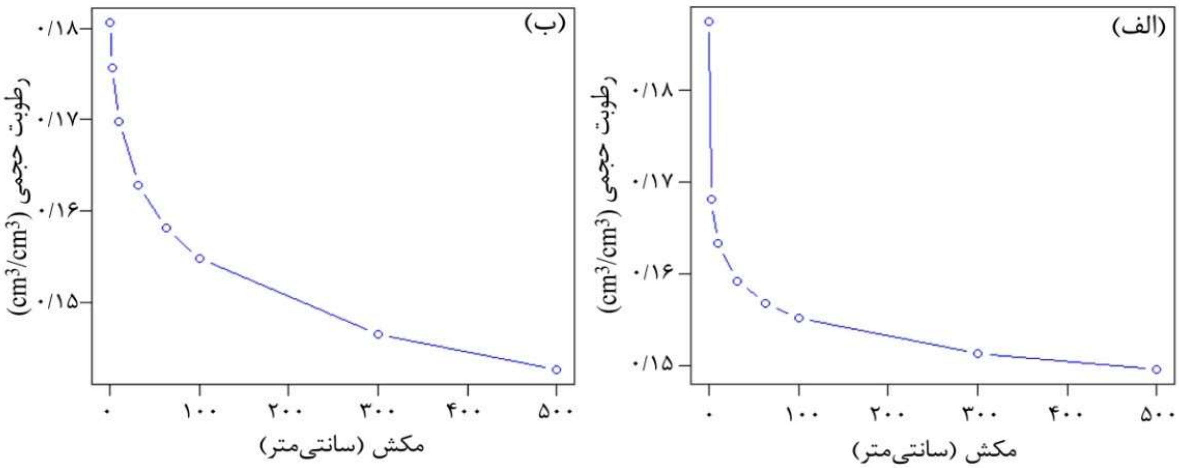
جدول ۲- مقایسه کارایی مدلهای مختلف در تشریح منحنی رطوبتی خاک

مدل	کل محدوده رطوبتی		نزدیک اشباع		نزدیک اون خشک	
	RSE	R^2	RSE	R^2	RSE	R^2
			مدلهای سه پارامتری			
کمپل	۰۸۱۳۴/۰	۵۲۴/۰	۰۰۷۶۶۵/۰	۸۷۹/۰	۰۰۳۷۰۳/۰	۹۷۸/۰
تانی	۰۷۸۷۳/۰	۵۶۶/۰	۰۰۴۹۸۳/۰	۹۵۱/۰	۰۰۴۷۴۹/۰	۹۶۴/۰
نمایی	۰۷۷۹۲/۰	۵۷۸/۰	۰۰۳۷۸۳/۰	۹۷۲/۰	۰۰۳۷۹۳/۰	۹۷۷/۰
			مدلهای چهار پارامتری			
گاردنر	۰۱۶۵۶۴/۰	۹۸۹/۰	۰۰۲۵۶۸/۰	۹۹۱/۰	۰۰۹۷۴۳/۰	۹۹۰/۰
روسو	۰۷۷۹۶/۰	۵۷۷/۰	۰۰۴۳۵۱/۰	۹۷۰/۰	۰۰۴۴۵/۰	۹۷۷/۰
بروکز و کوری	۰۷۹۹۱/۰	۵۴۸/۰	۰۰۸۰۶۶/۰	۸۹۴/۰	۰۰۳۸۱۳/۰	۹۸۳/۰
کاسوگی	۰۷۹۸۸/۰	۵۴۸/۰	۰۰۲۲۶۶/۰	۹۹۲/۰	۰۰۳۷۹۵/۰	۰.۹۸۳/۰
			مدلهای پنج پارامتری			
فردلانگ و زینگ	۰۷۷۰۳/۰	۵۹۲/۰	۰۰۲۶۴۶/۰	۹۹۱/۰	۰۰۳۵۲۳/۰	۹۹۰/۰
ونگنوختن	۰۷۷۰۵/۰	۵۹۱/۰	۰۰۲۵۶۸/۰	۹۹۲/۰	۰۰۴۷۸۹/۰	۹۸۲/۰
دو نمایی اوموتو	۰۱۷۱۷۴/۰	۹۸۸/۰	۰۰۲۴۶۳/۰	۹۹۰/۰	۰۰۲۴۴۷/۰	۹۹۳/۰



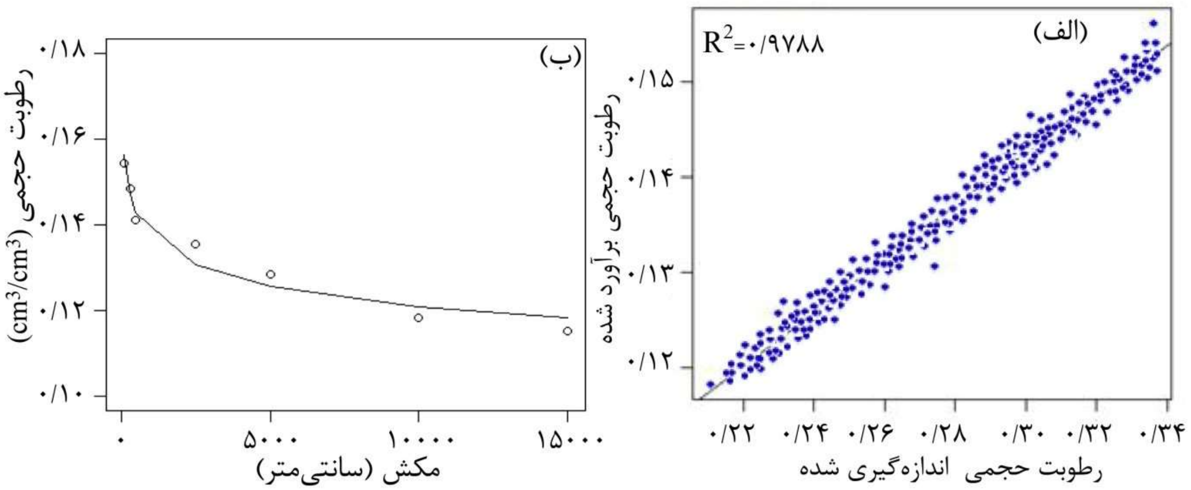
شکل ۲- بررسی عملکرد مدل گاردنر در خاکهای مورد مطالعه (الف) و منحنی رطوبتی خاک بر اساس مدل گاردنر(۱۹۵۸) (ب)

ب- نزدیک اشباع: همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است در بین مدلهای پنج پارامتری، مدل ونگنوختن (۱۹۸۰) دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین باقیمانده خطای استاندارد است. در حالیکه مدل کاسوگی (۱۹۹۹) و مدل نمایی بهترین عملکرد را به ترتیب در بین مدلهای چهار و سه پارامتری به خود اختصاص دادهاند. در محدوده نزدیک به اشباع، مدل ونگنوختن منحنی رطوبتی را بهتر از بقیه مدلها پیشبینی کرده است. در قسمت ب شکل ۳، منحنی رطوبتی خاک بر اساس معادله ونگنوختن بیان شده است. این معادله نقطه ورود هوا به خاک را مد نظر قرار نمیدهد اما دارای یک نقطه عطف است که این مدل را قادر میسازد تا نسبت به مدلهای دیگر (برای مثال مدل بروکز و کوری در شکل ۳ قسمت الف)) عملکرد بهتری در برازش بر دادههای اندازهگیری شده در منطقه نزدیک به اشباع از خود نشان دهد.



شکل ۳- منحنی رطوبتی بر اساس مدل بروکز و کوری (الف) و ونگنوختن (ب)

ج- منطقه آون خشک منحنی رطوبتی: تحلیل آماری انجام شده (جدول ۲) نشانگر عملکرد بهتر مدل کمپل (۱۹۷۴) در تشریح بخش خشک منحنی رطوبتی در بین مدلهای سه پارامتری است که در شکل۴ قسمتهای الف و ب نمایش داده شدهاند. فردلاند و زینگ (۱۹۹۴)، معتقدند که حذف پارامتر رطوبت باقیمانده از مدل میتواند کارایی تخمین آن را بخصوص در منطقه خشک منحنی رطوبتی بهبود بخشد که این مطلب میتواند دلیلی بر عملکرد بهتر مدل کمپل در بین سه پارامتریها باشد. مدلهای گاردنر و دو نمایی نیز در گروه خود بهترین عملکرد را داشتند. در کل، مدل دو نمایی بهترین کارایی تخمین را در منطقه خشک منحنی رطوبتی ارائه کرده است.



شکل ۴- بررسی عملکرد مدل کمپل در خاکهای مورد مطالعه (الف) و منحنی رطوبتی خاک بر اساس مدل کمپل (۱۹۵۸) (ب)

بطور کلی مدل دو نمایی ثبات عمل بیشتری را در بین هر سه گروه بخصوص در نواحی خشک و نزدیک اشباع از خود نشان داده و برازش بهتری بر دادههای این دو ناحیه داشته است. این نتایج بیانگر توانایی برازش این مدل بر کل محدوده رطوبتی خاک بوده، همچنین ناپیوستگیهای عددی که در سایر مدلها دیده میشود را ندارد. کارایی خوب این مدل را میتوان در دو نمایی بودن آن دانست زیرا دو قسمتی بوده و دو تابع توزیع اندازه حفرات را برای منافذ خاک بصورت جداگانه در نظر میگیرد (یکی برای فضای حفرات ساختمانی و دیگری برای فضای حفرات بافتی)، برخلاف اکثر مدلهای منحنی رطوبتی خاک که فضای حفرات ساختمانی را نادیده گرفته و همین امر منجر به توصیف نامناسب و غلط از ویژگیهای رطوبتی خاک در شرایط مزرعه میشود (Too et al., ۲۰۱۴). این نکته در مطالعات آینده باید رعایت شود که در بسط مدل برای تخمین منحنی رطوبتی، هر دو فضای منافذ بافتی و ساختمانی مورد توجه قرار گیرند.

منابع

Brooks R.H. and Corey A.T. ۱۹۶۴. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper, Vol. ۳, Colorado State University, Fort Collins.

Dexter A.R., Czyz E.A., Richard G. and Reszkowska A. ۲۰۰۸. A User-Friendly Water Retention That Takes Account of the Textural and Structural Pore Spaces in Soil. Geoderma, ۱۴۳:۲۴۳-۲۵۳.

Fredlung D.G. and Xing A. ۱۹۹۴. Equations for the Soil Water Characteristic Curve. Canadian Geotechnical Journal, ۳۱:۵۲۱-۵۳۲.

Khlosi M., Wim M.C., Ahmed D., Martinus T. and Donald G. ۲۰۰۸. Performance Evaluation of Models That Describe the Soil Water Retention Curve between Saturation and Oven Dryness. Vadose Zone Journal, ۷:۸۷-۹۶.

Leong E.C. and Rahardjo H. ۱۹۹۷. Review of Water Characteristic Curve Functions. Geotechnical and Geo-Environmental Engineering, ۱۲۳:۱۱۰۶-۱۱۱۷.

Marshall T.J., Holmes J.W. and Rose W.C. ۱۹۹۶. Soil Physics. Cambridge University Press, London.

Omuto C.T. ۲۰۰۷. HydroMe: Estimation of Soil Hydraulic Parameters from Experimental Data. R Comprehensive R Archive Network, USA.

Omuto C.T. ۲۰۰۹. Biexponential Model for Water Retention Characteristics. Geoderma, ۱۴۹:۲۳۵-۲۴۲.

Omuto C.T. and Gumbe L.O. ۲۰۰۹. Estimating Water Infiltration and Retention Characteristics Using a Computer Program in R. Computers and Geosciences, ۳۵:۵۷۹-۵۸۵.

Too V.K., Omuto C.T., Biamah E.K., and Obiero J.P. ۲۰۱۴. Review of Soil Water Retention Characteristic (SWRC) Models between Saturation and Oven Dryness . Open Journal of Modern Hydrology, ۴:۱۷۳-۱۸۲.
van Genuchten M.T. ۱۹۸۰. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal, ۴۴:۸۹۲-۸۹۸.
van Genuchten M.T., Leij F.J. and Yates S.R. ۱۹۹۱. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. EPA Report, ۶۰۰/۲-۹۱/۰۶۵, USA Salinity Laboratory, USDA.
Vanapalli S.K., Sillers W.S. and Fredlund M.D. ۱۹۹۸. The Meaning and Relevance of Residual State to Unsaturated Soils. ۵۱st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, ۴-۷ October ۱۹۹۸, ۱-۸.
Vogel T., van Genuchten M.T. and Cislerova M. ۲۰۰۱. Effect of the Shape of the Soil Hydraulic Functions near Saturation on Variably Saturated Flow Predictions. Advances in Water Resources, ۲۴:۱۳۳-۱۴۴.

Abstract

Soil water retention characteristic curve is the key soil property used in many applications in the fields of irrigation, hydrology, geotechnical engineering, water movement and solute transport. So, determination of models that can preciously show soil retention situation is important. All soils can be partially saturated with water and also near oven dryness. Therefore, constitutive models for soils should ideally represent the soil behavior over entire range. This paper reviewed commonly used SWRC models. In order to stem potential for biasness, the models were grouped in to three categories depending on the number of fitting parameters, namely, three, four and five-parameter categories. The evaluation used determination coefficient and residual standard error (RSE) to choose the best overall performing model and in each category. Its results serve as a guide for selecting the models to be preferred for fitting SWRC in case there are limitations to the number of suction potential levels in the measured data.