

Scaling Brooks-Corey Soil Water Retention Curve Using Minimum Data

GHOLAM HOSEIN LAKZAIANPOUR¹, MOHAMMAD MAHDI CHARI^{1*}, MAHMOOD TABATBAEI¹, PEYMAN AFRASIAB¹

1. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
(Received: Feb. 2, 2020- Revised: Apr. 13, 2020- Accepted: Apr. 16, 2020)

ABSTRACT

Measuring the soil water retention curve in the laboratory is time consuming and costly. For this purpose, researchers have developed some methods to reduce measurements. One of these methods is scaling. The objective of this study is to scaling the soil moisture retention curve using Brooks-Corey model for all textural classes. This method requires a reference curve and the moisture content in a specified suction. In this method the scaling factor is the logarithm of water content in a specified suction (e.g. θ_{1000}) in the reference soil to the logarithm of water content in the same suction of the proposed soil. The scaling factor obtained by the proposed method was evaluated with the scaling factor obtained by the statistical optimization method. In this study, 11 different soil texture classes data provided by Rawls *et al.* were used. The results showed that the scaling factor obtained based on the water content of θ_{330} , θ_{700} and θ_{1000} is close to the optimum scaling factor. The mean value of the sum of squares error for the proposed and optimization methods were 0.047 and 0.045, respectively. The mean value of the geometric mean error for the proposed and optimization methods were 1.024 and 1.047, respectively. The results showed that the reference curve is optional and each soil can be used as the reference curve. In the case of De-scaling, the soil water retention curve obtained by the proposed method was fitted very well to the one obtained from Brooks-Corey model.

Keywords: Soil Water Retention Curve, Scaling, Brooks-Corey, Soil Texture.

مقیاس‌سازی منحنی رطوبتی بروکس-کوری با استفاده از حداقل داده

غلامحسین لکزاییان پور^۱، محمد مهدی چاری^{۱*}، محمود طباطبایی^۱، پیمان افراسیاب^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۸)

چکیده

اندازه‌گیری منحنی رطوبتی در آزمایشگاه زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. به این دلیل پژوهش‌گران روش‌هایی را برای کاهش اندازه‌گیری‌ها ارائه کرده‌اند. یکی از این روش‌ها، مقیاس‌سازی است. هدف از این تحقیق مقیاس‌سازی منحنی رطوبتی به‌دست‌آمده با استفاده از مدل بروکس-کوری برای تمامی کلاس‌های بافتی خاک است. در این روش به یک منحنی مرجع و مقدار رطوبت در یک مکش خاص مورد نیاز است. فاکتور مقیاس در این روش برابر با مقدار لگاریتم رطوبت در یک مکش خاص در خاک مرجع به مقدار لگاریتم رطوبت در همان مکش در خاک مورد نظر است. فاکتور مقیاس به‌دست‌آمده با این روش با فاکتور مقیاس به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از داده‌های ۱۱ کلاس مختلف بافت خاک ارائه‌شده توسط رالز و همکاران استفاده شده است. نتایج نشان داد که فاکتور مقیاس به‌دست‌آمده بر اساس رطوبت θ_{330} ، θ_{700} و θ_{1000} نزدیک به فاکتور مقیاس بهینه است. مقدار میانگین مجموع مربعات خطا روش پیشنهادی برابر با ۰/۰۴۷ و روش بهینه‌سازی برابر با ۰/۰۴۵ بود. مقدار میانگین خطای متوسط هندسی برای روش پیشنهادی و بهینه‌سازی به ترتیب برابر با ۱/۰۲۴ و ۱/۰۴۷ بود. نتایج نشان داد که انتخاب منحنی مرجع اختیاری بوده و هر یک از خاک‌ها را می‌توان به‌عنوان منحنی مرجع انتخاب کرد. در حالت خارج کردن از مقیاس، نیز منحنی رطوبتی به‌دست‌آمده با روش ارائه‌شده در این تحقیق با دقت مناسبی بر منحنی رطوبتی به‌دست‌آمده از مدل بروکس-کوری برازش یافت.

واژه‌های کلیدی: منحنی رطوبتی، مقیاس‌سازی، بروکس-کوری، بافت خاک.

مقدمه

تعیین منحنی نگهداشت آب خاک (SWRC) که بیانگر رابطه بین فشار آب و محتوای آب است، برای بررسی جریان آب و انتقال مواد شیمیایی در محیط غیر اشباع اساسی است (Pollacco et al., 2017). از طرفی تغییر در بافت خاک، pH خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، مواد آلی، ضخامت ذرات رس سبب تغییر در منحنی مشخصه آب-خاک شده و لذا باید مجدداً اندازه‌گیری شود که نیاز به صرف وقت و هزینه زیادی است. در نتیجه یکی از مشکلات اساسی پیش روی دانشمندان علوم مرتبط با خاک نحوه-ی برخورد با تغییرپذیری ویژگی‌های خاک‌ها است. این تغییرپذیری به‌ویژه در توابع هیدرولیکی خاک‌ها، شامل منحنی رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی، تحلیل روابط جریان آب در خاک را با مشکل مواجه می‌کند. مقیاس‌سازی یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده برای ارزیابی فرآیند نفوذ (Sharma et al., 1980; Khatri and Smith, 2006; Babaei et al., 2018) و ویژگی هدایت هیدرولیکی (Ahuja and Williams 1991; Vogel et al., 1991; Tuli et al., 2001) تغییرپذیری خاک‌ها (Warrick et

al., 1980) و حل‌های عمومی معادلات حرکت آب در خاک (Sadeghi et al., 2012; Chari et al., 2019) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دو روش معمول برای به دست آوردن فاکتور مقیاس موجود است (Tillotson and Nielsen, 1984): (۱) تکنیک آنالیز ابعادی، که مبتنی بر وجود شباهت فیزیکی در سیستم است، مانند محیط‌های مشابه (Miller and Miller, 1956) و روش‌های بر اساس بعد فرکتال (Tyler and Wheatcraft 1990, Rieu and Sposito 1991) و (۲) روش تجربی که نرمال‌سازی تابعی نامیده می‌شود و مبتنی بر آنالیز رگرسیون است. در روش اول معمولاً فاکتور مقیاس دارای مفهوم فیزیکی بوده است. تحقیقات Kosugi (1998) and Hopmans (2001)، Tuli et al., (2001) Ghahraman et al., (2012) Zarrinfar and Davari (2012) و Sadeghi et al., (2016) نمونه‌هایی از کاربرد روش اول در توابع هیدرولیکی خاک‌ها هستند.

با توجه به اینکه به طور کلی خاک‌های مزرعه غیر متشابه هستند، فرضیات تجربی و کاربرد روش رگرسیونی بیشتر گسترش

(1964) Brooks-Corey استفاده می‌شود:

$$S_e = \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$K = K_s S_e^p \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این معادلات θ_s و θ_r به ترتیب درصد رطوبت اشباع و باقی‌مانده، S_e اشباع نسبی، h_b مکش ورود هوا، h مکش، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، λ شاخص توزیع اندازه ذرات و p پارامتر شکل است. λ و p به صورت $p = 3 + 2/\lambda$ با هم در ارتباط هستند (Sadeghi et al., 2012).

فرض اساسی در روش پیشنهادی این است که شکل مشخصات منحنی رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی علی‌رغم تغییر در مقدار رطوبت و هدایت هیدرولیکی تقریباً ثابت بوده است. داده‌های مورد نیاز برای به دست آوردن مشخصات منحنی رطوبتی برای هر خاک، با استفاده از فرآیند مقیاس‌سازی به یک منحنی نفوذ مرجع^۱ که پارامترهای آن مشخص است، تعیین شده و یک نقطه از داده‌های مکش-رطوبت کاهش می‌یابد.

چنانچه از دو طرف معادله (۱) لگاریتم گرفته شود، داریم:

$$\ln(S_e) = \lambda \ln(h_b) - \lambda \ln(h) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در معادله (۴) معادله منحنی رطوبتی به شکل معادله خطی تبدیل می‌شود. ابتدا پارامترهای معادله منحنی رطوبتی برای یک خاک دلخواه که خاک مرجع ($S_{e_{ref}}$) نامیده می‌شود، تعیین خواهند شد. چنانچه مقدار منحنی رطوبتی در یک مکش خاص (h_i) مشخص باشد، در نتیجه فاکتور مقیاس برای هر خاک (α_j) برابر است با:

$$\alpha_j = \left(\frac{\ln(S_{e_{ref}})}{\ln(S_{e_j})}\right)_{hi} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که z شماره خاک و h_i مقدار مکش خاص است.

مقدار منحنی رطوبتی مقیاس‌شده برای هر خاک در این روش برابر است با:

$$\ln(S_{e_j})_i = \alpha_j \ln(S_{e_{ref}})_i \quad (\text{رابطه ۶})$$

چنانچه منحنی رطوبتی را از حالت مقیاس خارج کرده و بخواهیم منحنی رطوبتی را برای هر خاک به دست آوریم، خواهیم داشت:

$$S_{e_j} = \exp\left[\frac{\ln(S_{e_{ref}})_i}{\alpha_j}\right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن $(S_{e_{ref}})_i$ مقدار اشباع نسبی در خاک مرجع برای مکش‌های مختلف است.

داده شده‌اند. در بیشتر این روش‌ها فاکتور مقیاس بهینه از طریق حداقل کردن اختلاف مجذور مربعات بین منحنی رطوبتی میانگین (مرجع) و منحنی رطوبتی مقیاس‌شده به دست می‌آید. Warrick (1977) et al. بیان کردند که برای یافتن فاکتورهای مقیاس‌سازی به جستجو برای طول مشخصه فیزیکی نیست. آن‌ها پیشنهاد کردند که منحنی مرجع را می‌توان با میانگینی از تمامی منحنی‌ها تعیین کرد و آنگاه فاکتورهای مقیاس به صورت تجربی می‌توانند به گونه‌ای به دست آیند که هر منحنی مقیاس‌شده با حداقل خطا بر روی منحنی مرجع واقع شود. (1991) Vogel et al. شرط تغییرپذیری خطی خاک‌ها را شرط لازم برای مقیاس‌بندی دانستند.

(2000) Hendrayanto et al. از روش نرمال‌سازی تابعی به منظور مقیاس‌سازی همزمان منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک استفاده کردند. در این تحقیق فاکتور مقیاس منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع با استفاده از روش بهینه‌سازی به دست آمده و سپس از ترکیب این دو روش یک فاکتور مقیاس برای هر دو معرفی شد. (1991) Williams and Ahuja منحنی رطوبتی ارائه‌شده به وسیله (1987) et al. را تبدیل به حالت خطی کرده و رابطه‌ای را بین پارامترهای این مدل با استفاده از فرآیند مقیاس‌سازی بیان کردند. (2003) Williams and Ahuja نشان دادند که منحنی رطوبتی به دست آمده با استفاده از مدل (1964) Brooks-Corey را می‌توان با استفاده از شاخص میانگین توزیع اندازه ذرات (λ) مقیاس کرد و یک معادله مقیاس‌شده یک پارامتری بیان کرد؛ به گونه‌ای که تمامی پارامترهای مدل بروکس-کوری به میانگین توزیع اندازه ذرات (λ) وابسته باشد. (2005) Kozak and Ahuja از پارامتر توزیع اندازه ذرات (λ) برای مقیاس‌کردن نفوذ و توزیع مجدد استفاده کردند. یکی از مشکلات روش‌های بیان‌شده تعیین میانگین توزیع اندازه ذرات (λ) است و برای اندازه‌گیری آن باید داده‌های مکش-رطوبت موجود و یا با استفاده از توابع انتقالی به دست آید که خود سبب ایجاد خطا می‌شود. هدف از این پژوهش ارائه روشی برای تعیین منحنی رطوبتی با استفاده از حداقل اطلاعات مزرعه (یک منحنی رطوبتی مرجع و مقدار رطوبت در یک مکش خاص) است؛ به طوری که برای طیف گسترده‌ای از خاک‌ها قابل استفاده باشد.

مواد و روش‌ها

روش پیشنهادی

در این تحقیق برای تشریح توابع هیدرولیکی خاک از توابع

روش بهینه‌سازی

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$GMER = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i)}{n} \right] \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این روابط، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در i نسبت خطا که از تقسیم P_i به O_i به دست می‌آید و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. هر چه مقدار SSE کوچکتر و ME نزدیک به صفر باشد، مدل مناسب‌تر است. مقدار بهینه $GMER$ برابر با یک می‌باشد و تطبیق بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های کلاس مختلف بافت خاک ارائه شده توسط ۱۱ Rawls et al., (1982) استفاده شده است. جدول (۱) میانگین پارامترهای منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع مدل بروکس-کوری را برای ۱۱ کلاس مختلف بافت خاک نشان می‌دهد. این پارامترها بر اساس ۱۳۲۳ نمونه خاک اندازه‌گیری شده توسط پژوهشگران مختلف به دست آمده است (Rawls et al., 1982).

با استفاده از روش بهینه‌سازی آماری فاکتور مقیاس به دست می‌آید. فاکتور مقیاس بهینه (α_{opt}) برای هر خاک با استفاده از حداقل کردن تفاوت مربعات خطا (SSE) بین منحنی مقیاس‌شده و منحنی مرجع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$SSE = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=1}^I (\ln(S_{e,ref}^i) - \alpha_i \ln(S_{e,obs}^{i,j}))^2 \right], i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \quad (\text{رابطه ۸})$$

که $S_{e,obs}^{i,j}$ اشباع مؤثر در مکش i ام و خاک j ، $S_{e,ref}^{i,j}$ اشباع مؤثر در مکش i ام و خاک مرجع، i تعداد مشاهدات در خاک j ، J تعداد نمونه خاک است.

ارزیابی

به منظور ارزیابی روش مقیاس‌سازی پیشنهادشده از مجموع مربعات خطا (SSE)، رابطه ۹) میانگین خطا (ME)، رابطه ۱۰) و نسبت خطای متوسط هندسی ($GMER$)، رابطه ۱۱) استفاده می‌شود:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (\text{رابطه ۹})$$

جدول ۱- مشخصات ۱۱ کلاس بافتی مورد استفاده

بافت خاک	میانگین تخلخل (θ_s)	میانگین رطوبت باقیمانده، θ_r	مکش ورود هوا $ h_b $	توزیع اندازه ذرات λ	پارامتر شکل p	میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع $cm\ h^{-1}$
Sand	۰/۴۳۷	۰/۰۲	۷/۲۶	۰/۵۹۱	۶/۳۸۴	۲۱
Loamy Sand	۰/۴۳۷	۰/۰۳۵	۸/۶۹	۰/۴۷۴	۷/۲۱۹	۱۱/۶
Sandy loam	۰/۴۵۳	۰/۰۴۱	۱۴/۶۶	۰/۳۲۲	۹/۲۱۱	۲/۵۹
Loam	۰/۴۶۳	۰/۰۲۷	۱۱/۵	۰/۲۲	۱۲/۰۹	۱/۳۲
Silty Loam	۰/۵۰۱	۰/۰۱۵	۲۰/۷۶	۰/۲۱۱	۱۲/۴۷۸	۰/۶۸
Sandy clay loam	۰/۳۹۸	۰/۰۶۸	۲۸/۰۸	۰/۲۵	۱۱	۰/۴۳
Clay loam	۰/۴۷۶	۰/۰۷۵	۲۵/۸۹	۰/۱۹۴	۱۳/۳۰۹	۰/۲۳
Silty clay loam	۰/۴۷۱	۰/۰۴	۳۲/۵۶	۰/۱۵۱	۱۶/۲۴۵	۰/۱۵
Sandy clay loam	۰/۴۳	۰/۱۰۹	۲۹/۱۷	۰/۱۶۸	۱۴/۹۰۴	۰/۱۲
Silty clay loam	۰/۴۷۹	۰/۰۵	۳۴/۱۹	۰/۱۲۷	۱۸/۷۴۸	۰/۰۹
Clay	۰/۴۷۵	۰/۰۹	۳۷/۳	۰/۱۳۱	۱۸/۲۶۷	۰/۰۶

نتایج و بحث

مقیاس‌سازی منحنی رطوبتی

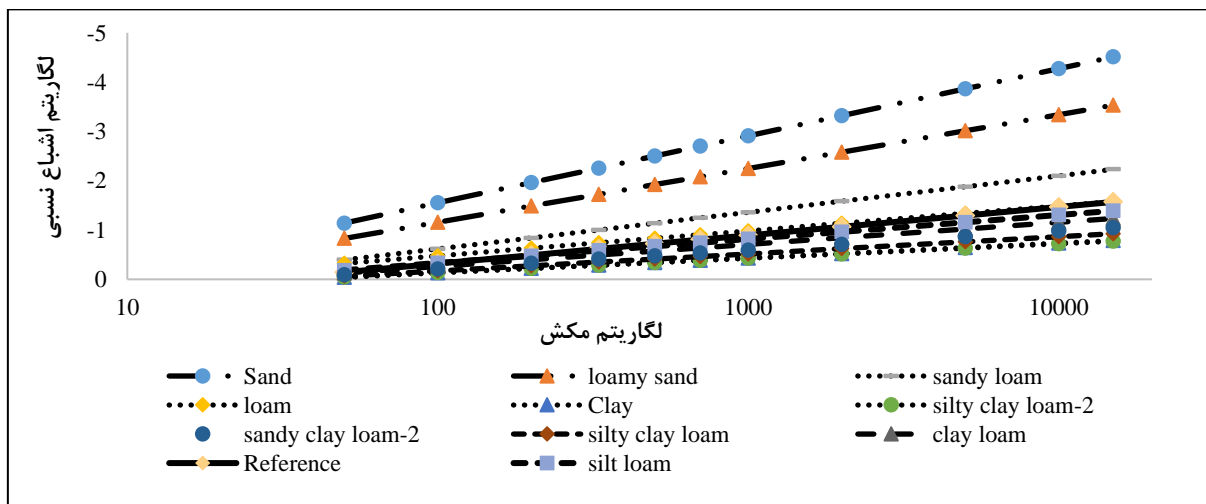
خاک‌های مختلف به دست آمد. پس از تعیین فاکتور مقیاس با استفاده از معادله (۶)، منحنی رطوبتی مقیاس‌شده رسم می‌شود. شکل (۲) منحنی رطوبتی مقیاس‌شده را برای بافت‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان می‌دهد که فرایند مقیاس‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی سبب شده است که منحنی رطوبتی به سمت منحنی مرجع میل کند. با توجه اینکه فاکتور مقیاس بر اساس رطوبت در مکش ۱۰۰۰ سانتی‌متر (θ_{1000}) به دست آمده است، مقادیر منحنی رطوبتی برای بافت‌های مختلف از این نقطه

شکل (۱) منحنی رطوبتی به دست آمده با استفاده از معادله Brooks-Corey (1964) را برای ۱۱ بافت خاک مختلف نشان می‌دهد. با توجه به انتخاب ۱۱ بافت متفاوت، شکل (۱) دارای پراکندگی زیاد بوده است. خاک Sandy Clay Loam به عنوان خاک مرجع انتخاب شده و سپس با استفاده از معادله (۵) و مقدار رطوبت در مکش ۱۰۰۰ سانتی‌متر آب فاکتور مقیاس برای

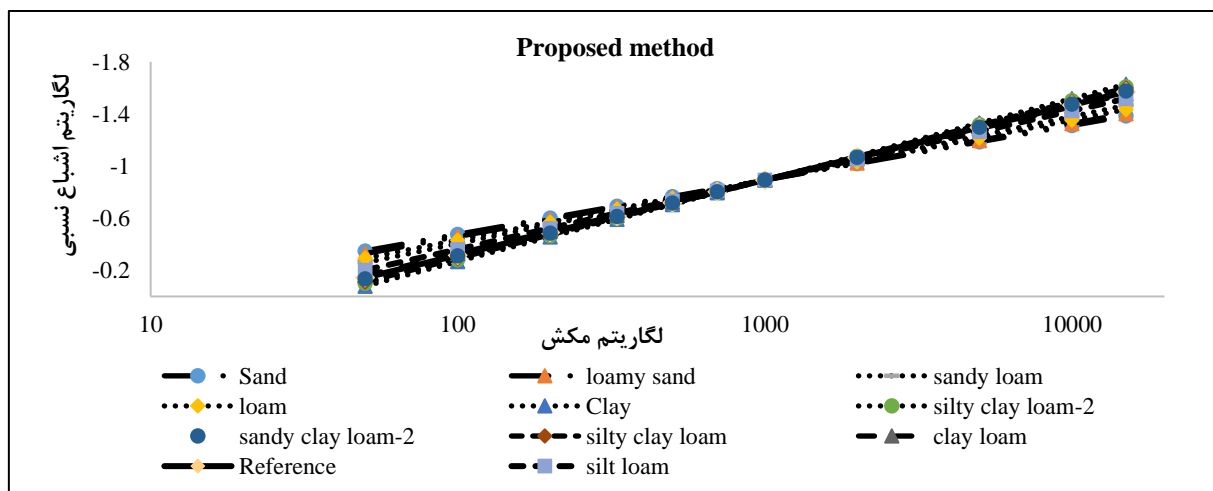
خاک‌های Silty clay loam، Silty clay، Sandy clay و Clay دارای مقادیر منفی بوده که نشان‌دهنده بیش‌برآورد رطوبت در این خاک‌ها است و برای سایر خاک‌ها مثبت بوده که نشان‌دهنده کم‌برآورد رطوبت در سایر خاک‌ها است. نتایج مقادیر ME برای روش بهینه‌سازی نیز الگویی مشابه روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. میانگین مقدار GMER در روش پیشنهادی برابر با ۱/۰۲۴ و برای روش بهینه‌سازی برابر با ۱/۰۴۷ است. مقدار GMER در خاک‌های Silty clay loam، Silty clay، Sandy clay و Clay برای هر دو روش کوچکتر از ۱ و برای سایر خاک‌ها بزرگتر از ۱ است. به طور کلی نتایج شکل (۲) و (۳) و جدول (۲) نشانی می‌دهد که تفاوتی بین روش پیشنهادی و روش بهینه‌سازی وجود ندارد و در تعدادی از خاک‌ها دقت روش پیشنهادی بیشتر از روش بهینه‌سازی است.

عبور می‌کنند. با استفاده از روش بهینه‌سازی (معادله ۸) فاکتور مقیاس بهینه برای منحنی‌های رطوبتی مختلف به دست آمد. شکل (۳) منحنی رطوبتی مقیاس‌شده با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی و استفاده از خاک Sandy Clay Loam به عنوان خاک مرجع را نشان می‌دهد.

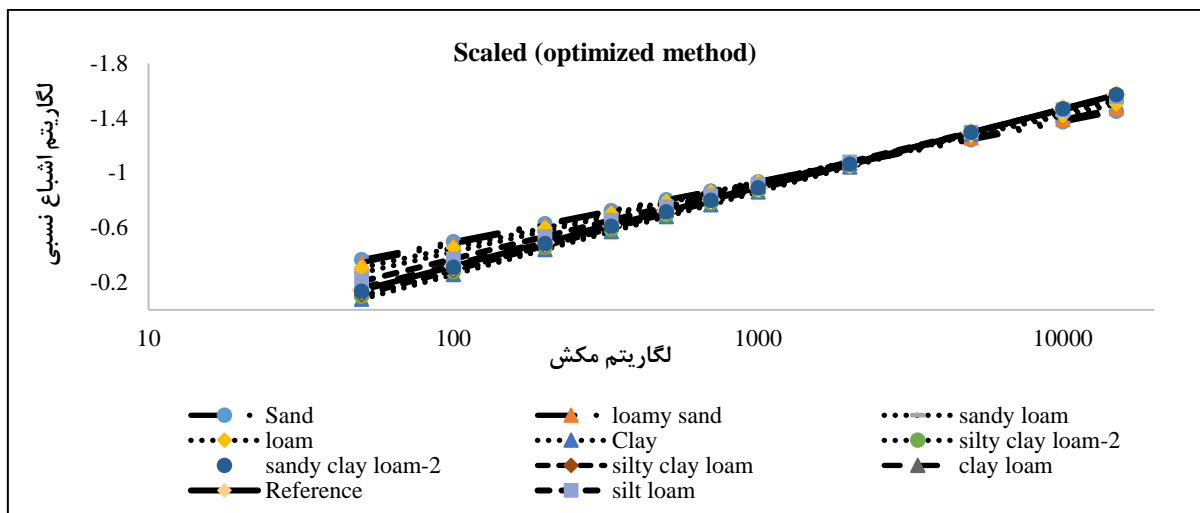
برای ارزیابی بهتر، جدول (۲) نتایج آماری روش پیشنهادی در مقایسه با روش بهینه‌سازی را بر اساس SSE، ME و GMER نشان می‌دهد. بیشترین مقدار SSE برای روش پیشنهادی در خاک Sandy با مقدار ۰/۱۶۲ بود و کمترین مقدار SSE برابر با ۰/۰۰۱ در خاک Clay loam و Sandy clay بود. در روش بهینه‌سازی بیشترین مقدار SSE در خاک Sandy با مقدار ۰/۱۵۲ و کمترین برابر با ۰/۰۰۱ در خاک Clay loam بود. میانگین مقادیر SSE برای روش پیشنهادی برابر با ۰/۰۴۷ و برای روش بهینه‌سازی برابر با ۰/۰۴۵ است. مقدار ME برای روش پیشنهادی در



شکل ۱- منحنی رطوبتی برای بافت‌های مختلف خاک



شکل ۲- منحنی نفوذ مقیاس‌شده بر اساس منحنی مرجع Sandy Clay Loam با استفاده از روش پیشنهادی



شکل ۳- منحنی نفوذ مقیاس شده بر اساس منحنی مرجع Sandy Clay Loam با استفاده از روش بهینه سازی

جدول ۲- نتایج آماری روش های پیشنهادی و بهینه سازی بر اساس Sandy clay loam به عنوان خاک مرجع

روش بهینه سازی			روش پیشنهادی			بافت خاک
GMER	ME	SSE	GMER	ME	SSE	
۱/۱۸۱	۰/۰۵۱	۰/۱۵۲	۱/۱۲۸	۰/۰۱۱	۰/۱۶۲	Sand
۱/۱۵۱	۰/۰۵۲	۰/۱۲۴	۱/۱۱۸	۰/۰۰۹	۰/۱۳۱	Loamy Sand
۱/۱۲۷	۰/۰۱۲	۰/۰۴۹	۱/۰۸۲	۰/۰۰۶	۰/۰۵۱	Sandy loam
۱/۱۵۳	۰/۰۲۸	۰/۰۸۲	۱/۱۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۸۵	Loam
۱/۰۷۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۱/۰۴۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۳	Silty Loam
۱	۰	۰	۱	۰	۰	Sandy clay loam ^a
۱/۰۲۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۱/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	Clay loam
۰/۹۵۲	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	۰/۹۸۶	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	Silty clay loam
۰/۹۸۹	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲	-۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	Sandy clay
۰/۹۳۳	-۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۹۵۶	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	Silty clay
۰/۸۹۶	-۰/۰۰۷	۰/۰۱۷	۰/۹۲۹	-۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	Clay
۱/۰۴۷	۰/۰۱۹	۰/۰۴۵	۱/۰۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۴۷	میانگین

a: Reference curve

۱ است. مقدار فاکتور مقیاس به دست آمده با استفاده از روش بهینه سازی بین ۰/۳۱۷ (در خاک Sandy) و ۲/۰۴ (در خاک Clay) متغیر بوده و دارای میانگین برابر با ۱/۱۹۸ است. مقدار فاکتور مقیاس به دست آمده بر اساس θ_{700} و θ_{1000} بیشترین نزدیکی را به فاکتور مقیاس به دست آمده بر اساس روش بهینه سازی دارد. مقدار میانگین فاکتور مقیاس بر اساس θ_{700} ، θ_{330} و θ_{1000} به ترتیب با مقدار ۱/۱۹۴، ۱/۱۹۸ و ۱/۲۰۰ بیشترین نزدیکی را با میانگین θ_{opt} دارد. (Kosugi and Hopmans (1998) و Tuli *et al.*, (2001) از مقدار مکش میانه به منظور مقیاس کردن منحنی رطوبتی لوگ-نرمال استفاده کردند. Khatari and Smith (2006) به منظور تعیین پارامترهای معادله نفوذ در آبیاری شیری با استفاده از مقیاس سازی از فاکتور مقیاس به دست آمده بر اساس

تاثیر رطوبت انتخابی در فاکتور مقیاس

در این بخش تاثیر رطوبت های مختلف به منظور به دست آوردن فاکتور مقیاس، مورد ارزیابی قرار می گیرد. جدول (۳) فاکتور مقیاس (α_{ij}) به دست آمده بر اساس خاک Sandy Clay Loam به عنوان منحنی مرجع با استفاده از دو روش بهینه سازی (α_{opt}) و روش پیشنهادی بر اساس رطوبت های مختلف (θ_{100} ، θ_{330} ، θ_{700} ، θ_{1000} ، θ_{5000} ، θ_{10000}) را نشان می دهد. کمترین مقدار فاکتور مقیاس با استفاده از روش پیشنهادی در خاک Sandy و استفاده از θ_{100} به دست آمده و بیشترین مقدار در خاک Clay با مقدار 2.46 است. در تمامی موارد مقدار فاکتور مقیاس برای خاک های Sandy loam، Loamy Sand، Sandy و Loam دارای مقادیر کوچکتر از ۱ و برای سایر خاک ها بزرگتر از

فاصله پیشروی تا میانه طول شیار استفاده کردند.

جدول ۳- فاکتور مقیاس به‌دست‌آمده در مکش‌های مختلف بر اساس Sandy clay loam به عنوان خاک مرجع

α_{opt}	α_{ij}						بافت خاک
	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۳۳۰	۱۰۰	
۰/۳۱۷	۰/۳۴۳	۰/۳۳۵	۰/۳۰۶	۰/۲۹۷	۰/۲۷۳	۰/۲۰۴	Sandy
۰/۴۰۵	۰/۴۳۹	۰/۴۳۰	۰/۳۹۷	۰/۳۸۶	۰/۳۵۷	۰/۲۷۴	Loamy Sand
۰/۶۷۲	۰/۶۹۹	۰/۶۹۰	۰/۶۵۶	۰/۶۴۶	۰/۶۱۴	۰/۵۱۳	Sandy loam
۰/۹۲۴	۰/۹۸۶	۰/۹۶۹	۰/۹۰۹	۰/۸۸۹	۰/۸۳۴	۰/۶۶۷	Loam
۱/۱۰	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۸	۱/۰۵	۰/۹۵۷	Silty Loam
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	Sandy clay loam ^a
۱/۲۶	۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۵	۱/۲۱	Clay loam
۱/۷۱	۱/۶۹	۱/۷۱	۱/۷۳	۱/۷۳	۱/۷۶	۱/۸۷	Silty clay loam
۱/۵۰	۱/۵۰	۱/۵۰	۱/۵۱	۱/۵۱	۱/۵۱	۱/۵۳	Sandy clay
۲/۰۶	۲/۰۴	۲/۰۵	۲/۰۸	۲/۱۰	۲/۱۴	۲/۳۳	Silty clay
۲/۰۴	۲/۰۱	۲/۰۲	۲/۰۷	۲/۰۹	۲/۱۶	۲/۴۶	Clay
۱/۱۹۸	۱/۲۱۱	۱/۲۰۹	۱/۲۰۰	۱/۱۹۸	۱/۱۹۴	۱/۲۰۱	میانگین

a:Reference curve

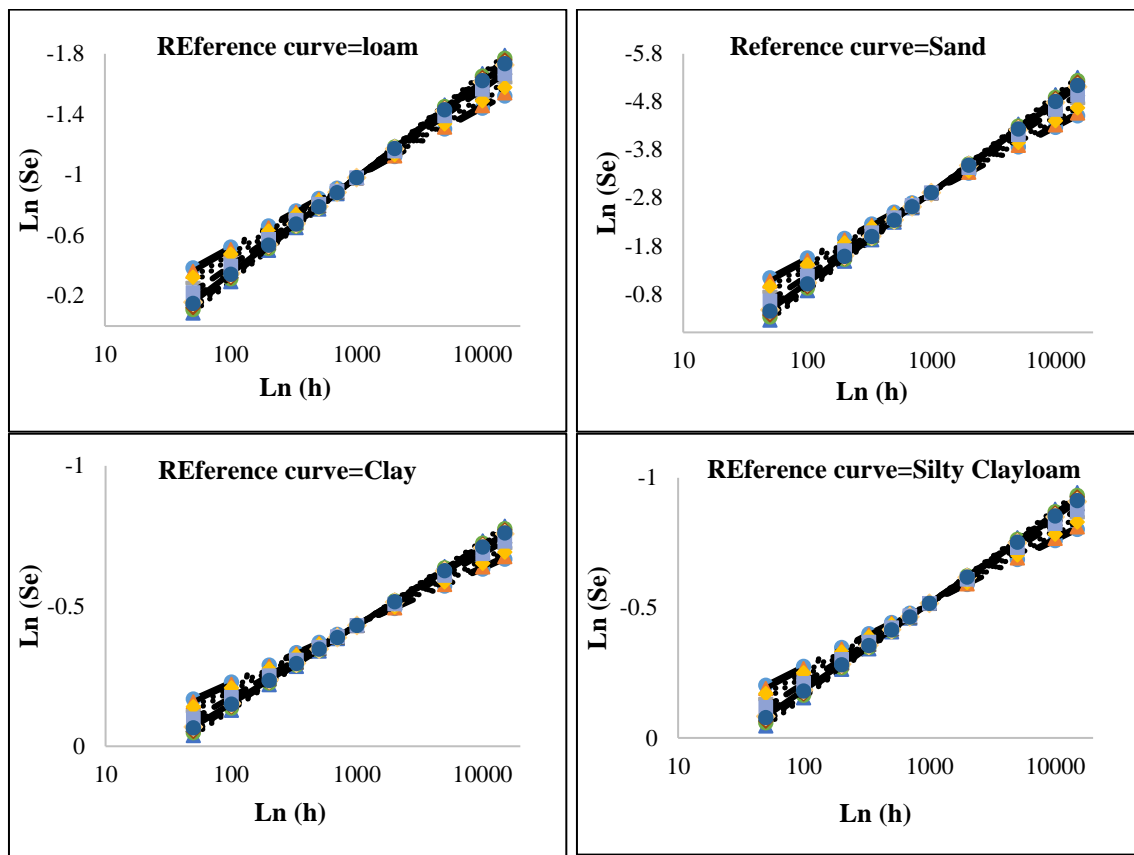
Sand، بیشترین فاصله را از دیگر منحنی‌های اشباع نسبی دارد. در نتیجه انتخاب خاک Sand به عنوان منحنی مرجع به منظور مقیاس‌سازی سبب می‌شود که برای مکش‌های خیلی زیاد و خیلی کم، فاصله نقاط مقیاس‌سازی شده با منحنی مرجع افزایش یابد. مقدار ME در خاک‌های Sand و Loam به عنوان خاک مرجع دارای مقادیر منفی و در خاک‌های Silty Clay Loam و Clay دارای مقادیر مثبت است. به طور کلی مقدار ME در تمامی موارد کوچک بود. مقدار GMER در خاک‌های Sand و Loam به عنوان خاک مرجع کمتر از ۱ و در خاک‌های Silty Clay Loam و Clay بزرگتر از ۱ است. مقدار GMER در خاک Loam با مقدار ۰/۹۴۲ و در خاک Silty Clay Loam با مقدار ۱/۰۴۳ بهتر از دو خاک دیگر بوده است. با توجه به جدول (۴)، نزدیک بودن مقدار GMER به عدد ۱ و همچنین کوچک بودن مقدار خطا، نشان از دقت بالای فرآیند مقیاس‌سازی در برآورد معادله نفوذ دارد. به طور کلی نتایج شکل (۴) و جدول (۱) مشخص می‌کند که انتخاب منحنی مرجع، اختیاری بوده و معادله‌های نفوذ مقیاس‌شده به-دست‌آمده از منحنی‌های مرجع متفاوت، یکسان می‌باشند.

تاثیر انتخاب منحنی مرجع بر مقیاس‌سازی منحنی رطوبتی برای تشریح بیشتر فرآیند مقیاس‌سازی منحنی رطوبتی و تاثیر منحنی مرجع روی نتایج، منحنی رطوبتی مقیاس‌شده بر اساس منحنی‌های مرجع مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۴) منحنی رطوبتی مقیاس‌شده بر اساس انتخاب خاک‌های Sand، Loam، Silty Clay Loam و Clay به عنوان منحنی مرجع را به ترتیب نشان می‌دهد. همچنین نتایج آماری مربوط به مقیاس-سازی منحنی نفوذ تجمعی بر اساس این منحنی‌های مرجع در جدول (۴) نشان داده شده است. شکل (۴) نشان می‌دهد که فرآیند مقیاس‌سازی ارائه‌شده در این پژوهش سبب شده که منحنی‌های رطوبتی به خوبی مقیاس شوند. همچنین نشان می‌دهد که روند مقیاس‌سازی برای تمامی خاک‌ها به عنوان منحنی مرجع یکسان است.

مقدار مجموع SSE برای خاک‌های Sand، Loam، Silty Clay و Clay به عنوان منحنی مرجع به ترتیب برابر با ۰/۳۱۴، ۰/۵۶۸، ۰/۲۸۷ و ۰/۲۱۹ است. به استثنای خاک Sand، در سایر خاک‌ها مقدار مجموع SSE کوچک و نزدیک یکدیگر است. مطابق شکل (۱) منحنی اشباع نسبی رسم‌شده در خاک

جدول ۴- نتایج شاخص‌های آماری بر اساس منحنی نفوذ مرجع مختلف

خاک مرجع	مجموع SSE	ME	GMER
Sand	۰/۳۱۴	-۰/۰۳۸۱	۰/۹۱۷
Loam	۰/۵۶۸	-۰/۰۰۵۳	۰/۹۴۲
Silty clay loam	۰/۲۸۷	۰/۰۰۱۴	۱/۰۴۳
Clay	۰/۲۱۹	۰/۰۰۲۲	۱/۱۱۲

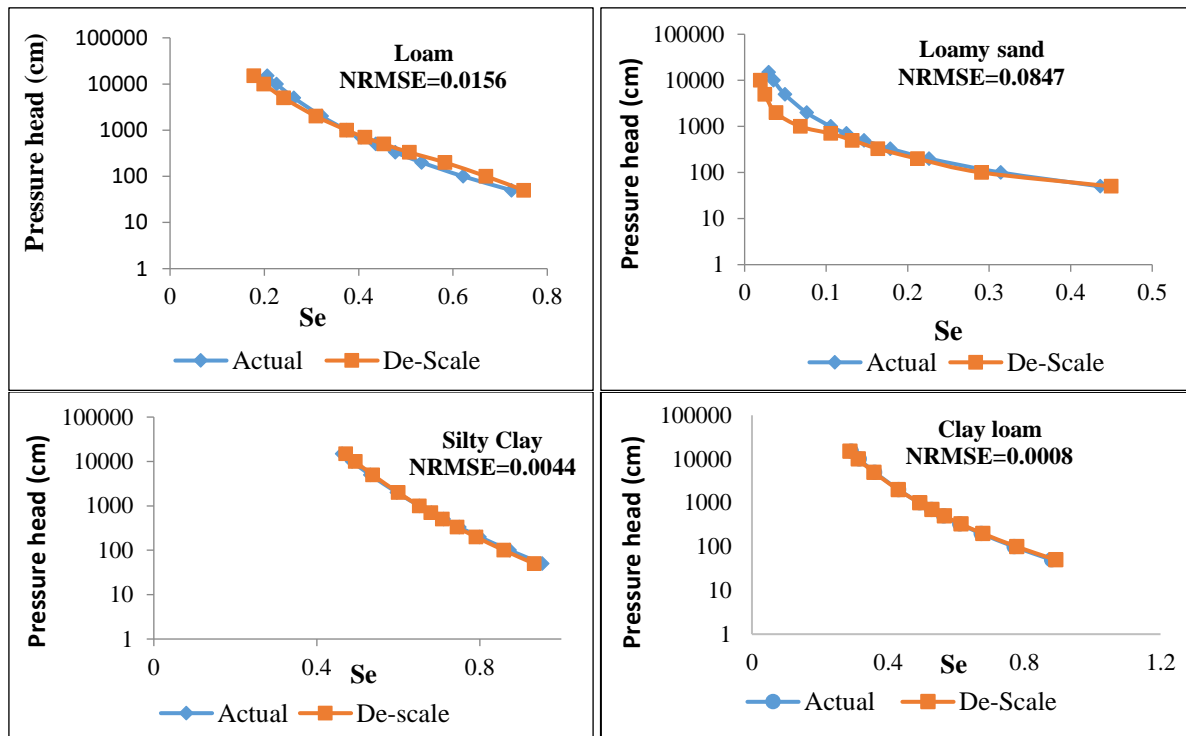


شکل ۴- مقیاس سازی منحنی رطوبتی بر اساس منحنی های مرجع متفاوت

دارای کمترین مقدار برابر با ۰/۰۰۰۸ در خاک Clay Loam و بیشترین مقدار برابر با ۰/۰۸۴۷ در Loamy Sand است. نتایج نشان می دهد که دقت منحنی رطوبتی به دست آمده با روش ارائه شده در این تحقیق در خاک های سنگین بیشتر از خاک های سبک است. با توجه به اینکه در معادله (۷) برای به دست آوردن فاکتور مقیاس از مکش ۱۰۰۰ سانتی متر استفاده شده است، مقدار رطوبت به دست آمده در مکش های میانه منحنی رطوبتی بیشترین نزدیکی را با رطوبت به دست آمده از معادله (۱) دارد. به طور کلی از نتایج شکل (۵) می توان نتیجه گیری کرد که معادله (۷) با دقت مناسبی منحنی رطوبتی را پیش بینی می کند.

خارج کردن از مقیاس (De-Scale)

برای ارزیابی جامع تر روش ارائه شده در این تحقیق، در شکل (۵) منحنی رطوبتی محاسبه شده با استفاده از معادله (۱) و به دست آمده با استفاده از فرآیند خارج کردن از مقیاس سازی (De-Scale) برای بافت خاک های Loam, Loamy Sand, Clay Loam, و Silty Clay رسم شده است. در فرآیند De-Scale پس از محاسبه فاکتور مقیاس (معادله ۵) با استفاده از معادله (۷)، منحنی رطوبتی از حالت مقیاس خارج شده و منحنی رطوبتی آن رسم می شود. نتایج نشان می دهد که منحنی رطوبتی به دست آمده با استفاده از معادله (۷) در خاک Clay Loam و Silty Clay کاملاً منطبق بر منحنی رطوبتی محاسبه شده با استفاده از معادله (۱) است. در شکل (۵) مقدار میانگین ریشه مربعات خطا ($NRMSE = \frac{\sqrt{SSE/N}}{\bar{p}}$) نیز برای هر یک از منحنی رطوبتی نشان داده شده است. مقدار $NRMSE$



شکل ۵- منحنی رطوبتی به‌دست‌آمده با استفاده از معادله ۱ و معادله ۷ برای خاک‌های مختلف

است. یکی از مزایای روش ارائه‌شده، دلخواه بودن منحنی رطوبتی بود؛ به گونه‌ای که هر خاکی را می‌توان به عنوان منحنی رطوبتی مرجع انتخاب کرد. روش ارائه‌شده برای طیف گسترده‌ای از خاک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش ارائه‌شده با دقت مناسبی منحنی رطوبتی را پیش‌بینی می‌کند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9618-122 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

اکثر روش‌های مقیاس‌بندی موجود بر اساس به حداقل رساندن مقدار اختلاف مربعات (SS) بین میانگین منحنی رطوبتی آب خاک و داده‌های رطوبتی مقیاس شده است. در این تحقیق یک مدل یک پارامتری بر اساس مدل بروکس-کوری با استفاده از فرآیند مقیاس‌سازی برای پیش‌بینی منحنی رطوبتی توسعه داده شد. برای به دست آوردن منحنی رطوبتی، به یک منحنی مرجع و مقدار رطوبت در یک مکش خاص نیاز است. نتایج نشان داد که چنانچه فاکتور مقیاس به‌دست‌آمده بر اساس رطوبت θ_{330} ، θ_{700} و θ_{1000} انتخاب شوند، مقدار آن به فاکتور مقیاس بهینه نزدیک

REFERENCES

- Ahuja, L.R., and Williams, R.D. (1991). Scaling water characteristics and hydraulic conductivity based on Gregson-Hector-McGowab Approach. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 308-319.
- Babaei, F., Zolfaghari, A.S., Yazdani, M.R., and Sadeghipour, A. (2018). Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran. *Catena*, 170, 25-35.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins. Hydrology Paper No. 3, 27p.
- Chari, M.M., Davari K., Ghahraman, B., and ziaiei, A. N. (2019). General equation for advance and recession of water in border irrigation. *Irrigation and Drainage*, 68 (3), 676-687.
- Ghahraman B., Sadeghi, M., and Gohardoust, M.R. (2012). Scaling of water characteristic curves for dissimilar soils. *Iranian Water Research*, 9, 113-120 (In Farsi).
- Gregson, K., Hector, D.J., and McGowan, M. (1987). A one-parameter model for the soil water characteristic. *J. Soil Science*, 38,483-486.
- Hendrayanto, K., Kosugi, K., and Mizuyama, T. (2000). Scaling hydraulic properties of forest soils. *Hydrol. Process*, 14, 521-538.
- Khatrri, K. L., and Smith, R. J. (2006). Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Science*, 25(1), 33-43.
- Kosugi, K., and Hopmans, J.W. (1998). Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1496-1504.

- Kozak, J. A., and Ahuja, L. R. (2005). Scaling of infiltration and redistribution of water across soil textural classes. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 816-827.
- Miller, E. E., and Miller, R. D. (1956). Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*, 27(4), 324-332.
- Pollacco, J. A. P., Webb, T., McNeill, S., Hu, W., Carrick, S., Hewitt, A., and Lilburne, L. (2017). Saturated hydraulic conductivity model computed from bimodal water retention curves for a range of New Zealand soils. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2725–2737.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 25:1315–1320.
- Rieu, M., and Sposito, G. (1991). Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 231 – 1238.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Warrick, A.W., Tuller, M., and Jones, S.B. (2016). A critical evaluation of the Miller and Miller similar media theory for application to natural soils. *Water Resources Research*, 52 (4), 1-18.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Ziaei, A.N., Davary, K., and Reichardt, K. (2012). Additional scaled solutions to Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil and Tillage research*, 119, 60-69.
- Sharma, M. L., Gander, G.A., and Hunt, C.G. (1980). Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology*, 45, 122-101.
- Tillotson, P.M., and Nielsen, D.R. (1984). Scale factors in soil science. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 953-959.
- Tuli, A., Kosugi, K., and Hopmans, J.W. (2001). Simultaneous scaling of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming lognormal pore-size distribution. *Advances in Water Resources* 24, 677-688.
- Tyler, S.W., and Wheatcraft, S. W. (1990). Fractal processes in soil water retention. *Water Resource Res*, 26(5), 1047-1054.
- Vogel, T., Cislerova, M., and Hopmans, J.W. (1991). Porous media with linearly hydraulic properties. *Water Resources Research*, 27(10), 2735-2741.
- Warrick A.W., Mullen G.J., and Nielsen D.R. (1977). Scaling of field measured hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resources Research* 13(2), 355-362.
- Williams, R.D., and Ahuja, L.R. (2003). Scaling and estimating the soil water characteristic using a one-parameter model. In Y. Pachepsky, D. E. Radcliffe, and H. M. Salim, (Ed), *Scaling Methods in Soil Physics*, (pp.35-48). Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Zarrinfar, S. and Davari, K. (2012). Scaling of the soil-water characteristic curve using non-similar media concept. *Journal of Water and Soil*, 25(6), 1448-1456. (In Farsi).