

مقاله علمی- پژوهشی

برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بر مبنای اصلاح پارامترهای مدل ون گنوختن - معلم

مجتبی شپاسی ارانی^۱، حجت امامی^{۲*}، بیژن قهرمان^۳، کامران داوری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

چکیده:

به منظور پیش‌بینی رفتار پدیده‌های مرتبط با خاک، داشتن دانش درباره جریان غیراشباع و به کارگیری مدل‌هایی که برآوردهای مطلوبی از منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی خاک ارائه دهند ضروریست. به رغم کاربرد فراوان مدل کلاسیک ون گنوختن- معلم (VGM)، به طور معمول، این مدل در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی ضعیف عمل نموده و اصلاح برخی از پارامترهای آن لازم است. در این پژوهش، تعداد ۲۸۳ خاک از بافت‌های مختلف بانک UNSODA انتخاب و در دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم شدند و پارامترهای زود یافت آنها استخراج و دسته‌بندی گردید. سپس، با تعریف هدایت هیدرولیکی غیراشباع اصلاح شده (K_{sc}) به جای هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و تعیین محدوده‌هایی برای پارامترهای I و n ، به حل رابطه هدایت هیدرولیکی - رطوبت این مدل با استفاده از ۲۴۶۰۰ جفت نقطه I و n برای هر یک از خاک‌های سه کلاس اصلی بافت خاک پرداخته شد. در ادامه، مقدار I بهینه هر کلاس بافتی بر اساس مقدار کمیته خطای برآورد هدایت هیدرولیکی با استفاده از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انتخاب گردید و n های ایجاد کننده کمیته خطا، به عنوان ضرایب توزیع اندازه منافذ بهینه رابطه هدایت هیدرولیکی - رطوبت (\hat{n}_{opt}) انتخاب شدند. به منظور ایجاد توابع انتقالی برآورد کننده \hat{n}_{opt} ، در برنامه MATLAB، روش رگرسیون گام به گام با در نظر گرفتن شرط معناداری آماری ($P=0.05$) مقایسه نتایج روش پیشنهادی این پژوهش (MVGM) با مدل VGM با استفاده از شاخص‌های RMSE و ضریب کارایی نش ساتکیف (NSE) پرداخته شد. نتایج نشان داد که در هر دو بخش، ایجاد روابط و صحت‌سنجی، روش MVGM در برآورد هدایت هیدرولیکی عملکرد مطلوب‌تری داشته و دارای شاخص کارایی بالاتری برای تمامی کلاس‌های بافت خاک بوده است.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، ضریب شکل، مدل ون گنوختن، منحنی مشخصه آب خاک، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع

مقدمه

همسانی تغییرات رطوبت در محدوده‌ای خاص از یک دوره و... در تعیین رفتار جریان آب در خاک موثر هستند. پی بردن به وضعیت حرکت آب در یک خاک غیراشباع، نیازمند دانش درباره منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع آن خاک می باشد (Tamari et al., 1993).

متداول‌ترین روش شبیه‌سازی رفتار جریان در یک خاک غیراشباع، استفاده از معادله ریچاردز است. با استفاده از این معادله می‌توان حرکت آب را در محیط غیرهمرند خاک شبیه‌سازی نمود (Richards, 1931). معادله ریچاردز ترکیبی است از معادلات داریسی و پیوستگی که در حالت جریان یک‌بعدی، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) \quad (1)$$

که در آن، θ درصد رطوبت حجمی خاک، h پتانسیل ماتریک آب خاک، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک به عنوان تابعی از

یکی از مهم‌ترین مسائل در علوم مختلف مرتبط با خاک، آگاهی از وضعیت جریان آب در خاک است. عواملی همچون سابقه خشک و تر شدن خاک (پسماند)، پیوسته یا منقطع بودن آن، بی‌نظمی یا

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

(Email: hemami@um.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.1.14.8

هیدرولیکی در پتانسیل ماتریک h (L³/L³)، Se درجه اشباع موثر، n ضریب توزیع اندازه منافذ و α (L⁻¹) و m پارامتر شکل معادله محسوب می‌شود. l نیز به عنوان پارامتر منعکس کننده اثر اوجاج و اتصال منافذ بوده و مقدار بهینه آن بر اساس مطالعات انجام شده توسط تعدادی از پژوهشگران ۰/۵ گزارش شده است (Mualem, 1976; Shaap et al., 1998).

در روش VGM، پارامتر n ، از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده - θ_h بر رابطه ۲ به دست آمده و برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع، به طور مستقیم در رابطه ۳ قرار می‌گیرد. همچنین، مقدار بهینه l وابسته به بافت خاک نبوده و برای تمامی خاک‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از پژوهش‌ها به این موضوع اشاره شده که به کارگیری این روش با معیارهای ذکر شده، به برآورد ضعیف مقدار هدایت هیدرولیکی منجر می‌شود (شیاسی ارانی و همکاران، ۲۰۰۱؛ Shaap et al, 2001؛ Twarakavi et al, 2008؛ Shaap et al, 2000). در این خصوص، بررسی، اصلاح و بهینه‌سازی برخی از پارامترهای پیش‌فرض این مدل ضروری به نظر می‌رسد.

پس از معرفی مدل VGM توسط ون گنوختن، پژوهش‌های متعددی در جهت اصلاح و بهینه‌سازی ضرایب تجربی این مدل انجام شده است. برای مثال، شپ و لیج نشان دادند که این مدل، در برآورد مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع، دارای بیش برآورد یا کم‌برآورد است (Schaap and Leij, 2000). وریکن با انتخاب مجموعه‌ای از خاک‌ها به این نتیجه رسید که پیش‌بینی‌های مطلوب از هدایت هیدرولیکی غیراشباع، با انتخاب مقدار $l=0.5$ همخوانی مناسبی نداشته و در بسیاری موارد، مقادیرهای l منفی، تخمین‌های مطلوب‌تری از هدایت هیدرولیکی ارائه می‌دهند (Vereecken, 1995). شپ و لیج نیز با انجام پژوهشی بر روی ۲۳۵ خاک، به بهینه‌سازی هم‌زمان l و K_s پرداختند. یافته‌ها نشان داد که استفاده از هدایت هیدرولیکی متناظر با پتانسیل ماتریک ۴ سانتی‌متر به جای K_s و مقادیرهای منفی l ، برآوردهای بهتری را نتیجه می‌دهد (Schaap and Leij, 2000). به دست آمدن برآوردهای مطلوب‌تر از هدایت هیدرولیکی غیراشباع با انتخاب مقدار منفی برای l و جایگزینی K_s متناظر با نقاط پتانسیل ماتریک نزدیک به صفر در مطالعات دیگری نیز تایید شده است (امامی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Kaveh and van Genuchten, 1992; Kosugi, 1999; Dexter, 2004; Peters, 2013). پارامتر دیگر موثر در برآورد هدایت هیدرولیکی مدل VGM، مقدار n است. این پارامتر، به طور معمول، از رابطه $\theta-h$ مدل VGM و از برازش داده‌های منحنی مشخصه استخراج شده و به طور مستقیم در رابطه هدایت $K-\theta$ همین مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما برخی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که این جایگزینی، خطای برآورد هدایت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد. برای مثال، شیاسی ارانی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی ۳۲ خاک از بافت‌های مختلف

پتانسیل ماتریک، t زمان و z فاصله از سطح مرجع در عمق خاک می‌باشد.

برای حل این معادله، به جفت داده‌های مقادیر رطوبت حجمی و هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌های ماتریک مختلف نیاز است. با توجه به این که اندازه‌گیری این داده‌ها (به خصوص هدایت هیدرولیکی) کاری سخت و زمان‌بر بوده و نیازمند دستگاه‌های خاص و پیچیده و نیروی آموزش دیده می‌باشد، برآورد داده‌ها، به عنوان روش جایگزین اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین تلاش‌ها در راستای توسعه مدل‌های برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع و توسط دو پژوهشگر به نام‌های کوزنی و کارمن انجام گرفت (Carman, 1937; Kozeny, 1927). در سال‌های بعد، چایلدز و جرج، بر پایه نتایج پژوهش کوزنی، تئوری‌هایی را درباره نفوذپذیری در محیط متخلخل بر مبنای توزیع اندازه منافذ خاک بیان کردند که به نحوه ارتباط رطوبت با مقدار پتانسیل ماتریک اشاره داشت (Child and George, 1950). با لحاظ نمودن تئوری‌های ذکر شده، بوردین و معلم مدل‌هایی را برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه ارائه نمودند (Burdine, 1953; Mualem, 1976). رابطه ارائه شده توسط معلم، عملکرد مطلوب‌تر این مدل را در مقایسه با مدل‌های پیشنهادی پیشین نظیر چایلدز و جرج و همچنین بوردین نشان می‌داد (van Genuchten, and Nielsen, 1985; Mualem, 1976; Vereecken, 1995). در ادامه پژوهش‌های انجام شده توسط معلم، ون گنوختن یک تابع قاعده‌مند تجربی قوی که بیان کننده رابطه بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک بود را با رابطه مبتنی بر توزیع اندازه منافذ که توسط معلم برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ارائه شده بود ترکیب کرد که به مدل ون گنوختن - معلم (VGM) معروف شد (van Genuchten, 1980).

پرکاربردترین مدل در بین مدل‌های ارائه شده برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، مدل ون گنوختن - معلم (که در این پژوهش به اختصار مدل VGM نامیده می‌شود) می‌باشد (van Genuchten, 1980). در این مدل، روابط ۲ و ۳ به ترتیب برای بیان وابستگی رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به مقدار پتانسیل ماتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s Se^l \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2, \quad m = 1 - 1/n, \quad Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad n > 1 \quad (3)$$

که در این روابط، h مقدار پتانسیل ماتریک، θ (L³/L³) رطوبت حجمی خاک در پتانسیل ماتریک h (L³/L³)، θ_s رطوبت حجمی اشباع خاک، θ_r (L³/L³) رطوبت حجمی باقیمانده در پروفیل خاک، K_s (L/T) هدایت هیدرولیکی اشباع، $K(h)$ (L/T) هدایت

نرم افزار MATLAB به نحوی نوشته شد تا از بین خانواده کلاس های بافتی مختلف بانک خاک UNSODA خاک های دارای اطلاعات کافی انتخاب و داده های آنها برداشت شود. شرایط خاک های منتخب به شرح زیر تعیین شد.

الف - از خانواده های سه کلاس اصلی بافت های شن، لوم و رس باشند.

ب - خاک منتخب تا حد ممکن دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده های θ -h اندازه گیری شده، در محدوده رطوبت اشباع تا نزدیک به نقطه پژمردگی دائم (۱۵۰۰۰ سانتی متر) باشد. کمترین و بیشترین تعداد داده های θ -h در بین خاک های منتخب به ترتیب ۵ و ۶۶ و میانگین آنها حدود ۱۰ جفت نقطه می باشد.

پ - خاک منتخب، دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده های K - θ در محدوده گسترده ای از پتانسیل ماتریک (رطوبت) باشد. کمترین و بیشترین تعداد داده های K - θ در بین خاک های برگزیده به ترتیب ۴ و ۵۹ و میانگین تعداد برداشت ها حدود ۱۶ جفت نقطه می باشد.

ت - اطلاعات تمامی خاک ها از شاخه گذر از خیزی به خشکی منحنی مشخصه برداشت گردید.

ث - برای افزایش تعداد خاک ها، در مواردی که برداشت های جفت نقاط هدایت K - θ ثبت نشده بود، داده های نقاط K - h برداشت و مقدار رطوبت در مقدار پتانسیل ماتریک متناظر یکسان با منحنی مشخصه استخراج و به هدایت هیدرولیکی منتسب گردید.

ج - برای خاک هایی که برای آنها مقدار رطوبت اشباع در بانک ثبت نشده بود، با رعایت اولویت، مقدار متناظر با رطوبت در نقطه پتانسیلی صفر، رطوبت متناظر با هدایت هیدرولیکی اشباع و یا درصد تخلخل به عنوان درصد رطوبت اشباع منظور گردید.

چ - خاک هایی که دارای خطا در برداشت بودند کنار گذاشته شدند (برای مثال افزایش هدایت هیدرولیکی با افزایش پتانسیل ماتریک).

بانک UNSODA دریافتند که در ۷۵ درصد نمونه های منتخب، مقدار n حاصل از رابطه θ -h مدل VGM، کم تر از مقدار n بدست آمده از برازش داده ها بر رابطه K - θ است و این موضوع، باعث کم برآورد کردن هدایت هیدرولیکی می شود (شیاسی ارانی و همکاران، ۱۴۰۰). در این خصوص، شپ و ون گنوختن، با انجام پژوهشی، دریافتند که تخمین پارامترهای خاک با استفاده از داده های منحنی مشخصه، برآوردهای نسبتاً ضعیفی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع با مدل VGM بدست می دهد (Schaap and van Genuchten, 2005). با توجه به این ضعف، کونگ و همکاران برای تابع K - θ مدل VGM، رابطه ای مشابه با معادله θ -h این مدل ارائه کردند که در آن، مقدار m به صورت $m_1=1+1/n_1$ و $m_2=1+1/n_2$ (که $n_1 \neq n_2$) و هر دو پارامتر n_1 و n_2 از برازش داده های اندازه گیری شده بر مدل VGM به دست می آید (Kong et al, 2016). به منظور کاهش نیاز به اندازه گیری داده ها، لو و همکاران بر پایه اطلاعات ۲۷ خاک، تابعی انتقالی را برای برآورد مقدار n_2 در رابطه ارائه شده توسط کونگ و همکاران ارائه نمودند که در آن n_2 تابعی از n_1 بود (Lu et al, 2019). هر چند نتایج برآورد هدایت هیدرولیکی با این رابطه در مقایسه با روش کلاسیک VGM مطلوب تر بود، اما مشارکت تعداد محدود خاک، ثابت فرض نمودن مقدار $l=0.5$ و عدم بهینه سازی هم زمان ضرایب l و n را می توان به عنوان نقص دو پژوهش اخیر برشمرد.

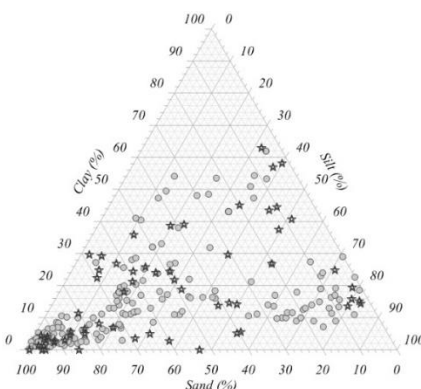
از آنجا که بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک، به بهبود نتایج معادله ریچاردز در شبیه سازی تغییرات محیط خیس شده خاک در آبیاری سطحی، نحوه جذب آب توسط ریشه و همچنین پایش شوری و تغییرات عناصر خاک کمک نموده و به تبع آن، به اخذ تصمیمات مدیریتی جهت کنترل شرایط آب و خاک در مزرعه کمک می کند، لزوم بررسی و اعمال برخی اصلاحات هم زمان همچون تصحیح K_s ، بهینه سازی l و برآورد مطلوب n مختص رابطه K - θ را نمایان می سازد.

مواد و روش ها

برای گردآوری اطلاعات مورد نیاز این پژوهش، ابتدا برنامه ای در

جدول ۱- ویژگی های کلی خاک های منتخب از بانک UNSODA

میانگین هندسی قطر ذرات (mm)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/day)	رطوبت باقی مانده (m ³ /m ³)	رطوبت اشباع (m ³ /m ³)	چگالی ظاهری (kg/m ³)	درصد			شاخص آماری
					شن	سیلت	رس	
۰/۳۰۶	۲۴۹/۲	۰/۱۲۵	۰/۴۲۰	۱۴۹۰	۱۶/۲	۲۶/۱	۵۷/۶	میانگین
۰/۲۹۴	۳۳۱/۱	۰/۰۹۰	۰/۱۰۲	۲۱۰	۱۵/۳	۲۳/۶	۳۱/۲	انحراف معیار
۰/۰۰۴	۰/۱	۰/۰۰۹	۰/۲۰۰	۴۹۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱۰۰	مقدار کمینه
۰/۹۷۸	۲۷۸۴	۰/۳۹۷	۰/۸۳۸	۱۹۷۰	۶۳/۰	۹۰/۰	۹۷/۷	مقدار بیشینه



شکل ۱- توزیع خاک‌ها بر روی مثلث خاک. ●: خاک‌های منتخب بخش واسنجی؛ ★: خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی

(UNSODA)، به همین دلیل، فرض انتخاب مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع اصلاح شده به جای هدایت هیدرولیکی اشباع پذیرفته شد. انتخاب K_{sc} بر مبنای روش کار زیر انجام شد:

- بر پایه نتایج شپ و لیچ، در صورت وجود مقدار هدایت هیدرولیکی متناظر با پتانسیل ماتریک ۴ سانتی‌متر (K_0)، این مقدار به عنوان K_{sc} انتخاب گردید (Schaap and Leij, 2000).
- به منظور انعطاف و امکان انتخاب بیشتر تعداد خاک‌های دارای داده، محدوده ۱ تا ۷ سانتی‌متر (± 3) سانتی‌متر نسبت به معیار ۴ سانتی‌متر) نیز با اولویت پذیرش مقدار متناظر با همسایگی پتانسیل ماتریک ۴ سانتی‌متر، به عنوان مقدار قابل قبول برای انتخاب K_0 پذیرفته شد.
- در صورت عدم برداشت هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌های ماتریک تعیین شده، مقدار هدایت هیدرولیکی گزارش شده در نقطه پتانسیلی صفر یا همان K_s به عنوان K_{sc} در محاسبات منظور گردید. به طور خلاصه، در صورت وجود مقدار K_0 (هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در یکی از نقاط متناظر با پتانسیل ماتریک ۱ تا ۷ سانتی‌متر)، این مقدار به عنوان K_{sc} و در غیر این صورت، مقدار K_s به عنوان K_{sc} در محاسبات منظور شده است.

بهینه‌سازی مقدارهای l و n در رابطه $K-\theta$ مدل VGM

به منظور یافتن مقدارهای بهینه l و n رابطه $K-\theta$ مدل VGM در هر کلاس بافت خاک، ابتدا گستره‌ای از جفت نقاط l_i و n_j به عنوان ورودی رابطه $K-\theta$ مدل VGM ایجاد و در ادامه، با جایگزین کردن مقدارهای K_{sc} به جای K_s ، مقدارهای هدایت هیدرولیکی در هر جفت نقطه l_i و n_j و برای هر یک از خاک‌های یک کلاس بافتی معین محاسبه گردید. در ایجاد جفت نقاط، بر پایه پیشینه نتایج

پس از گزینش خاک‌ها، تعداد ۲۸۳ خاک با تعداد ۲۶۹۹ جفت مقدار $\theta-h$ و $K-\theta$ جفت نقطه $K-\theta$ به عنوان خاک‌های منتخب معرفی گردید. از این تعداد، ۲۲۱ و ۶۲ خاک به ترتیب برای دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی برگزیده شدند. این تقسیم‌بندی، بر اساس تحلیل و پیشنهاد غلامی و همکاران مبنی بر در نظر گرفتن ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل داده‌ها برای بخش صحت‌سنجی صورت گرفت (Gholami et al., 2019). در جدول ۱، ویژگی‌های کلی خاک‌های منتخب ارائه شده است. میانگین هندسی قطر ذرات، از رابطه ۴ (پیشنهاد شده توسط شیرازی و بورسما) محاسبه شده است (Shirazi and Boersma, 1984).

$$\phi = \exp[0.01 \times \sum_{i=1}^3 f_i \times \ln(m_i)] \quad (4)$$

که در آن، ϕ میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی‌متر، f_i درصد ذرات خاک در هر میانگین قطری (m_i) و m_i میانگین حسابی قطر ذرات خاک در هر گروه یا کلاس اندازه‌ای ذرات خاک (i) است که مقدار آن بر اساس معیار USDA، ۰/۰۰۱، ۰/۰۲۶ و ۱/۰۲۵ میلی‌متر، به ترتیب برای رس، سیلت و شن تعیین شده است. در شکل شماره ۱، نحوه توزیع خاک‌های منتخب دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی، بر اساس طبقه‌بندی USDA^۱، بر روی مثلث بافت خاک نمایش داده شده است.

اصلاح و بهینه‌سازی پارامترهای روابط مدل VGM

جایگزینی هدایت هیدرولیکی اشباع اصلاح شده (K_{sc}) به جای هدایت هیدرولیکی اشباع

برخی خاک‌ها، به دلیل دارا بودن شکاف، ترک و حفره‌های بزرگ، در بخش‌هایی نزدیک به رطوبت اشباع، رفتاری نامتعارف را همچون تغییرات ناگهانی هدایت هیدرولیکی در مقابل تغییرات اندک رطوبت از خود نشان می‌دهند (برای مثال خاک شماره ۴۶۲۱ بانک

1- United States Department of Agriculture

واقعی به کل تغییرات بوده و هرچه به یک نزدیک تر باشد، پیش‌بینی مدل دقیق تر است. آماره آزمون فیشر (F^*) نیز نشانگر سهمی است که مدل رگرسیونی نسبت به باقی‌مانده‌ها در بیان پراکندگی کل دارد. هر چه این مقدار بزرگتر باشد، سیگما کوچکتر شده و مدل رگرسیونی مناسب‌تر خواهد بود. مقدار خطای برآورد این توابع را نیز می‌توان با شاخص آماری میانگین خطای مطلق (MAE) سنجید. مقدار MAE از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد.

$$MAE_{\hat{n}_{opt}} = \frac{\sum_{i=1}^m |\hat{n}_{opt} - \hat{n}_i|}{m} \quad (۶)$$

که در آن، \hat{n}_i ضریب توزیع اندازه منافذ بدست آمده از توابع انتقالی و m تعداد خاک‌های هر کلاس می‌باشد. در ادامه، روش پیشنهادی این پژوهش که بر بهینه‌سازی و اصلاح پارامترهای l ، n و K_s مدل VGM استوار است، با عنوان «روش اصلاح شده VGM» معرفی و با $MVGM^1$ نمایش داده خواهد شد.

ارزیابی عملکرد روش‌های VGM و MVGM

به منظور مقایسه میزان دقت و صحت برآورد هدایت هیدرولیکی حاصل از دو روش VGM و MVGM، نتایج پیش‌بینی شده در دو بخش، یکی پس از ایجاد توابع انتقالی و بر پایه خاک‌های شرکت کننده در این بخش و دوم، بر مبنای خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده‌اند. یکی از بهترین شاخص‌های توصیه شده جهت ارزیابی مهارت پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیکی، شاخص کارایی نش‌ساتکلیف (NSE) می‌باشد که توسط نش و ساتکلیف ارائه شده است (Nash and Sutcliffe, 1970; McCuen et al, 2006; Lin et al, 2017). مقدار این شاخص می‌تواند از یک تا منفی بی‌نهایت تغییر کند و در حالت ایده‌آل دارای مقدار یک می‌باشد. NSE_K به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$NSE_K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\bar{K}))^2} \quad (۷)$$

در این رابطه، $\log_{10}(\bar{K})$ ، لگاریتم میانگین مقدارهای اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نتایج و بحث

انتخاب مقدار \hat{A} برای کلاس‌های مختلف بافت خاک

در این بخش، به منظور نمایش دیداری نحوه انتخاب مقدار \hat{A} برای کلاس‌های مختلف بافت خاک، در شکل ۲، کمینه‌های $RMSE_K$ در مقابل l_i ‌های مختلف رسم گردیده است. بیشترین مقدار خطای برآورد مربوط به کلاس شن و کمترین آنها مربوط به کلاس

پژوهش‌های انجام شده محدود به ۱ تا ۴ با گام افزایشی ۰/۰۰۵ برای n و مقدارهای ۱۰- تا ۱۰+ (به عنوان بازه اولیه) با گام افزایشی ۰/۵ برای l در نظر گرفته شد (Carsel and Parrish, 1988; Vrugt et al., 2001; Verma et al, 2009; Garey et al., 2010). در هر l_i ، مقدارهایی از n_i که در آنها، مقدار خطای برآورد هدایت هیدرولیکی بر پایه شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE_K$) برای هر خاک در یک کلاس بافتی کمینه شده بود حفظ و بقیه کنار گذاشته شدند. در نهایت، مقدار وزنی میانگین خطای برآورد هدایت هیدرولیکی در هر l_i ، برای مجموع نقاط برداشتی تمامی خاک‌های یک کلاس با استفاده از شاخص $RMSE$ محاسبه گردید و بر پایه آن، مقدار l_i متناظر با مقدار کمینه این شاخص در هر کلاس بافتی، به عنوان l بهینه (\hat{l}) آن کلاس برگزیده شد. همچنین، مقدار n_i ‌های کمینه کننده $RMSE$ در \hat{l} هر کلاس، به عنوان ضرایب توزیع اندازه منافذ بهینه رابطه $K-\theta$ برای مجموعه خاک‌های آن کلاس بافتی پذیرفته شدند. مقدار $RMSE_K$ از رابطه شماره ۵ محاسبه می‌گردد.

$$RMSE_K = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{m}} \quad (۵)$$

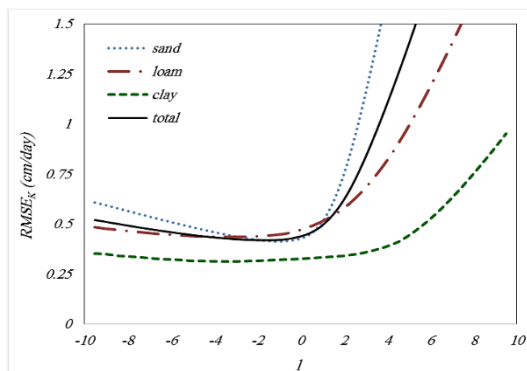
که در آن، $\log_{10}(K_i)$ لگاریتم مقدار اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در رطوبت (پتانسیل ماتریک) m ، $\log_{10}(\hat{K}_i)$ لگاریتم مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی متناظر با رطوبت (پتانسیل ماتریک) m و تعداد مشاهدات می‌باشد. مقیاس لگاریتمی برای هدایت هیدرولیکی، جهت جلوگیری از اثرپذیری تابع در مقدارهای مربوط به رطوبت‌های زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ایجاد توابع انتقالی برآورد کننده \hat{n}_{opt} به روش تحلیل رگرسیون

در این پژوهش، جهت رسیدن به تابعی انتقالی برای برآورد مقدارهای \hat{n}_{opt} به عنوان متغیر وابسته، ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۱ برای خاک‌های منتخب هر کلاس به عنوان متغیرهای مستقل دسته‌بندی و برای آنها، روش رگرسیون گام به گام در نرم‌افزار MATLAB اجرا گردید. به منظور بررسی وجود ارتباط احتمالی مقدار n (مقدار ضریب حاصل از برازش داده‌های منحنی مشخصه بر رابطه $\theta-h$ مدل VGM) با مقدار \hat{n}_{opt} ، مقادیر n نیز به همراه دیگر متغیرهای مستقل خاک معرفی شد تا ارتباط آن با \hat{n}_{opt} بررسی شود. در ایجاد روابط انتقالی بایستی شرط معناداری تاثیرگذاری متغیرهای مستقل در برآورد متغیر وابسته صادق باشد ($\delta < 0.05$). در این صورت، می‌توان گفت که با احتمال ۹۵ درصد، پارامترهای منتخب در پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته اثرگذار هستند. علاوه بر نقش انفرادی متغیرها، بایستی توانایی هر رابطه نیز در پیش‌بینی متغیر وابسته با تحلیل واریانس مشخص شود. بر مبنای نتایج تحلیل واریانس، آماره R^2 معرف نسبت مجموع مربعات تفاضل مقدارهای برآورد شده از

در جدول شماره ۲، مقدار عددی خطای برآورد هدایت هیدرولیکی نسبت به مقدارهای اندازه‌گیری شده در لاهای مختلف برای سه کلاس اصلی خاک و همچنین تمامی خاک‌ها برای مجموعه خاک‌های منتخب بخش ایجاد مدل ارائه شده است.

رس می‌باشد. نمودارهای رسم شده نشان می‌دهد که بسته به کلاس بافت خاک، انتخاب مقدار l جداگانه برای هر کلاس می‌تواند به کاهش مقدار خطا و افزایش مطلوبیت نتایج برآورد شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده منجر شود.



شکل ۲- مقادیر خطای برآورد هدایت هیدرولیکی در لاهای مختلف در سه کلاس بافتی شن، لوم، رس و تمامی خاک‌ها

جدول ۲- مقدار $RMSE_K$ به ازای لاهای مختلف برای خاک‌های بخش ایجاد مدل

$RMSE_K$ (cm/day)																
l																
-۵	-۴/۵	-۴	-۳/۵	-۳	-۲/۵	-۲	-۱/۵	-۱	-۰/۵	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	کلاس
۰/۴۸۴	۰/۴۷۱	۰/۴۵۹	۰/۴۴۸	۰/۴۳۸	۰/۴۲۸	۰/۴۲۱	۰/۴۱۴	۰/۴۱۲	۰/۴۱۵	۰/۴۲۷	۰/۴۵۲	۰/۵۰۹	۰/۶۰۶	۰/۷۴۷	۰/۹۳۰	شن
۰/۴۲۸	۰/۴۳۶	۰/۴۳۴	۰/۴۳۳	۰/۴۳۴	۰/۴۳۵	۰/۴۳۷	۰/۴۴۱	۰/۴۴۵	۰/۴۵۴	۰/۴۶۹	۰/۴۸۸	۰/۵۱۱	۰/۵۴۱	۰/۵۷۷	۰/۶۲۴	لوم
۰/۴۲۴	۰/۴۲۲	۰/۴۱۹	۰/۴۱۷	۰/۴۱۵۷	۰/۴۱۶۳	۰/۴۱۶۷	۰/۴۱۷	۰/۴۱۸	۰/۴۱۸	۰/۴۲۰	۰/۴۲۲	۰/۴۲۳	۰/۴۲۶	۰/۴۲۸	۰/۴۳۳	رس
۰/۴۴۵	۰/۴۳۸	۰/۴۳۳	۰/۴۲۸	۰/۴۲۴	۰/۴۲۱	۰/۴۱۹	۰/۴۱۸	۰/۴۲۰	۰/۴۲۶	۰/۴۳۸	۰/۴۵۸	۰/۴۹۲	۰/۵۴۶	۰/۶۲۰	۰/۷۱۶	تمامی خاک‌ها

* با توجه به افزایش مقدار خطا در مقدار لاهای بزرگتر از ۲/۵ و کوچکتر از -۵، $RMSE_K$ فقط برای مقادیر بین این دو عدد در جدول درج شده است. اعداد پررنگ، مقدار خطای کمینه هستند.

با توجه به این که $0 < Se < 1$ ، ترم Se^1 در رابطه $K-\theta$ به شدت زیاد شده و مقدار $K(h)$ محاسباتی از K_{sc} بزرگتر می‌شود. برای مثال، آغاز نقض این شرط در خاک‌های کلاس بافت رس، در مقدار l_i های بزرگتر از ۳- و در رطوبت‌های نزدیک به رطوبت باقی‌مانده نمایان شد. نتیجه آن که با منفی‌تر شدن مقدار l_i و همچنین، افزایش مقدار η ، احتمال برآورد مقدارهایی بزرگتر از K_{sc} برای برخی نقاط افزایش می‌یابد.

ایجاد توابع انتقالی برآورد کننده \hat{n}_{opt} با استفاده از روش رگرسیون گام به گام

به منظور ایجاد توابعی انتقالی که قادر باشند مقدارهای \hat{n}_{opt} را بر مبنای پارامترهای زودیافت خاک برآورد نمایند، رگرسیون گام به گام برای سه کلاس اصلی بافت خاک و همچنین کل خاک‌ها، در نرم‌افزار MATLAB اجرا گردید. در ادامه، ابتدا روابط رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش در جدول شماره ۳ معرفی می‌گردند.

بر اساس جدول شماره ۲، مقدارهای l برای کلاس‌های بافت شن، لوم و رس به ترتیب ۱-، ۳-۳/۵ و ۳- و برای کل خاک‌ها -۱/۵- به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که بر خلاف روش VGM، مقدارهای منفی برای l_i برآوردهای مطلوب‌تری را از هدایت هیدرولیکی نتیجه داده است. نتایج پژوهش‌های متعدد، رسیدن به برآوردهای مطلوب‌تر هدایت هیدرولیکی را در مقدارهای منفی این پارامتر تایید می‌کنند (Vereecken, 1995; Kosugi, 1999; Shaap and Leij, 2000; Peters, 2013).

در انتخاب مقدارهای l و \hat{n}_{opt} علاوه بر کمینه شدن مقدار $RMSE_K$ ، شرط $1 < \frac{K(h)}{K_{sc}} < 1$ نیز بایستی رعایت شود. چرا که با انتخاب K_{sc} به جای K_s ، فرض بر این است که بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی برای هر خاک K_{sc} می‌باشد. در این مرحله، چنانچه مقدار l_i های شرکت کننده در محاسبات بیش از مقدار خاصی منفی شوند،

جدول ۳- روابط رگرسیونی بدست آمده جهت برآورد ضریب توزیع اندازه منافذ رابطه K-θ بر پایه روش پیشنهادی

رابطه رگرسیونی	کلاس بافت
$\hat{n} = 0.35805 + 0.10571 \times \log K_s + 0.013138 \times Sa$	شن
$\hat{n} = 2.06134 - 0.56810 \times \theta_r - 0.48787 \times \log K_s - 0.30884 \times n + 0.74573 \times \theta_r \times \log K_s + 0.20082 \times \log K_s \times n$	لوم
$\hat{n} = 1.2745 + 8.3359 \times \theta_r - 0.0236 \times \log K_s + 0.912 \times Si - 0.2904 \times \theta_r \times Si$	رس
$\hat{n} = 1.4283 + 0.2344 \times \emptyset + 0.0426 \times n$	تمامی بافت‌ها

جدول ۴- شاخص‌های آماری معرف دقت و خطای برآورد \hat{n} برای خاک‌های بخش ایجاد توابع انتقالی به همراه آماره‌های F^* و δ

کلاس بافت	R ²	MAE	F* > F _{R,E}	δ
شن	۰/۵۹۷	۰/۲۰۲	F* = ۶۳/۷۵ > F _{r,۱۸۶}	۰/۰۰۰
لوم	۰/۷۲۱	۰/۱۲۴	F* = ۵۲/۲۵ > F _{d,۱۰۰}	۰/۰۰۰
رس	۰/۸۸۴	۰/۰۲۷	F* = ۵۹/۰۰ > F _{r,۳۱}	۰/۰۰۰
تمامی بافت‌ها	۰/۲۰۳	۰/۲۱۷	F* = ۲۷/۴۹ > F _{r,۳۱۸}	۰/۰۰۰

F_{R,E} معرف F جدول فیشر با درجه آزادی R برای رگرسیون و درجه آزادی E برای خطا می‌باشد.

بررسی خطای برآورد هدایت‌های هیدرولیکی با روش‌های VGM و MVGM

به منظور یافتن بیشترین خطا در رفتار هر یک از روش‌های VGM و MVGM در برآورد مقادیر هدایت هیدرولیکی، شاخص‌های آماری ME و MAE در ۶ بازه از پتانسیل ماتریک خاک برای کلاس‌های مختلف بافت و همچنین تمامی خاک‌ها در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است.

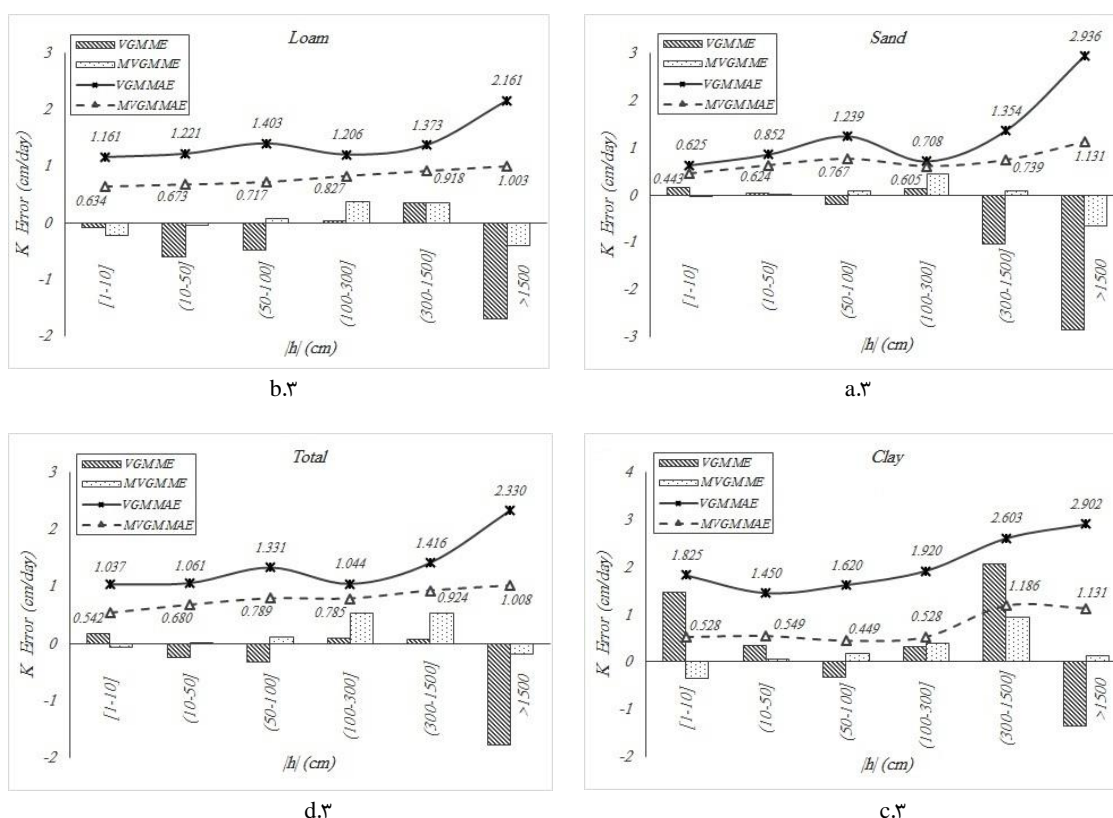
بر مبنای شکل ۳، روند تغییرات میانگین مطلق خطا در هر دو روش و برای تمامی کلاس‌های بافتی مشابه است. همچنین، مقدار میانگین خطای مطلق برآورد با روش MVGM در تمامی بازه‌ها کمتر از VGM است که نشان می‌دهد برآوردهای بدست آمده از MVGM مطلوب‌تر هستند. علاوه بر این موارد، همچنین، در تمامی کلاس‌های بافت خاک، در پتانسیل‌های ماتریک بزرگتر از ۱۵۰۰ سانتی‌متر، روش VGM به کم‌برآورد کردن هدایت هیدرولیکی تمایل دارد.

شاخص MAE با وزن‌دهی یکسان به تمامی نقاط برآورد شده، در مقایسه با شاخص RMSE، نسبت به نقاط پرت دارای حساسیت کمتری می‌باشد. از این رو، استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا، نقش برآوردهای پرت به دست آمده از مدل را به عنوان یک خطای ساختاری آن، بیشتر نمایان می‌کند. با توجه به این خصوصیت، برای مقایسه برآوردهای دو روش VGM و MVGM، شاخص RMSE_K برای هر کلاس بافتی محاسبه گردید. همچنین، به منظور ارزیابی کارایی دو روش ذکر شده، مقدار شاخص NSE_K نیز محاسبه و مقادیر آن در جدول شماره ۵ گزارش شده است.

در این روابط، \hat{n} ضریب توزیع اندازه منافذ معادله K-θ (برآورد شده با روابط رگرسیونی ایجاد شده)، $\log K_s$ (cm/day) مقدار لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع (مبنای ۱۰)، Sa (٪) مقدار شن خاک، Si (٪) مقدار سیلت خاک، θ_r (cm³/cm³) معادل رطوبت حجمی باقی‌مانده خاک، \emptyset (mm) متوسط قطر هندسی ذرات و n ضریب توزیع اندازه منافذ حاصل از برازش داده‌ها بر رابطه θ-h مدل VGM می‌باشند.

در جدول ۴، مقدار R² و MAE توابع انتقالی در برآورد \hat{n} به همراه دو پارامتر F^* و δ برای کلاس‌های بافتی مختلف ارائه شده است.

بر مبنای مقدارهای R² ارائه شده در جدول شماره ۴، دقت رابطه ایجاد شده برای کلاس بافت رس، در پیش‌بینی متغیر وابسته \hat{n} بیشتر از سایر روابط می‌باشد. توابع کلاس‌های بافت لوم و شن نیز به ترتیب قادر به پیش‌بینی ۷۲/۱ و ۵۹/۷ درصد از تغییرات \hat{n} می‌باشند. همچنین، مقدارهای F^* محاسبه شده برای هر کلاس بافتی از عدد جدول فیشر بزرگتر بوده و مقدار سیگما نیز در تمامی موارد کمتر از ۰/۰۵ است. بر پایه این نتایج، با توجه به پیچیدگی محیط خاک، دقت روابط به دست آمده برای دو کلاس رس و لوم بسیار خوب و برای کلاس شن خوب ارزیابی می‌شود. هرچند تابع به دست آمده برای تمامی خاک‌ها، تنها قادر به پیش‌بینی ۲۰/۳ درصد از تغییرات \hat{n}_{opt} بوده و به طور کلی ضعیف ارزیابی می‌گردد.



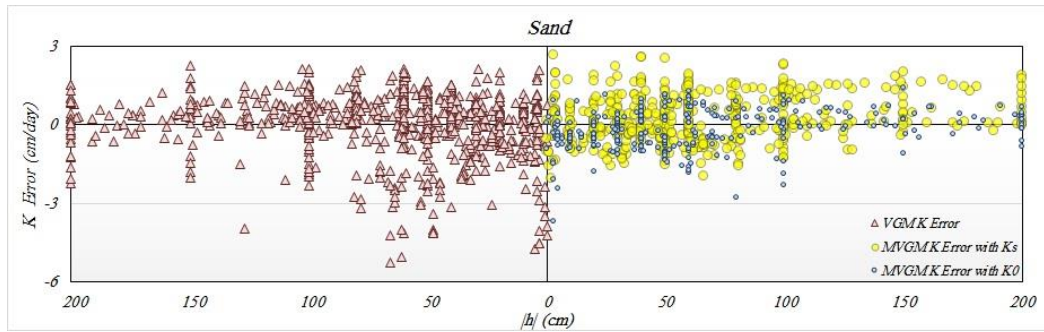
شکل ۳- مقدار خطای برآورد به روش های VGM و MVGM با شاخص های آماری ME و MAE برای بازه های تعریف شده پتانسیل ماتریک

جدول ۵- ارزیابی روش های VGM و MVGM در برآورد هدایت هیدرولیکی با خاک های منتخب بخش ایجاد مدل

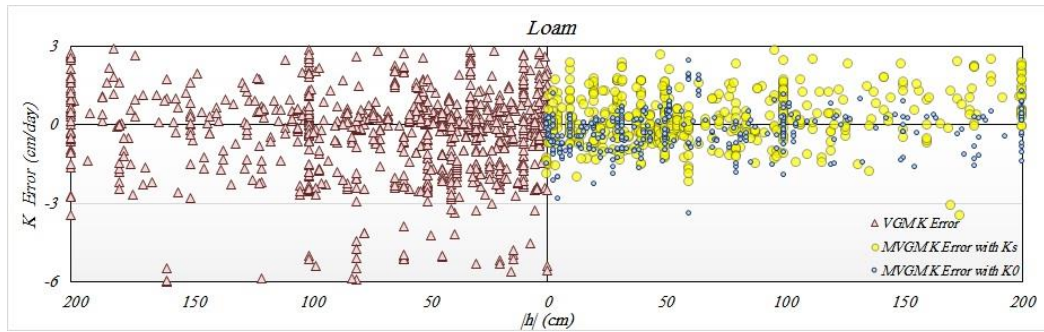
MVGM			VGM			کلاس بافت
NSE _K	RMSE _K (cm/day)	پارامترها	NSE _K	RMSE _K (cm/day)	پارامترها	
۰/۷۶۰	۰/۷۹۵	$K_{sc}, \hat{l}=-1, \hat{n}$	۰/۲۶۹	۱/۳۹۲	$K_s, l=0.5, n$	شن
۰/۴۳۰	۱/۰۷۲	$K_{sc}, \hat{l}=-3.5, \hat{n}$	-۰/۱۹۰	۱/۹۷۵	$K_s, l=0.5, n$	لوم
۰/۵۳۵	۱/۰۰۹	$K_{sc}, \hat{l}=-3, \hat{n}$	-۲/۰۵۱	۲/۵۸۵	$K_s, l=0.5, n$	رس
۰/۶۲۰	۰/۹۹۹	$K_{sc}, \hat{l}=-1.5, \hat{n}$	-۰/۱۹۷	۱/۷۷۴	$K_s, l=0.5, n$	تمامی خاک ها

مجموع خاک ها، کمتر از مقدار رضایت بخش قرار می گیرد. در مجموع، بر اساس شاخص های مختلف آماری، عملکرد کلی روش MVGM در مقایسه با روش VGM بسیار مطلوب ارزیابی می شود. چنانچه در روش MVGM، برآوردهای به دست آمده برای هدایت هیدرولیکی بر مبنای K_0 را از برآوردهای حاصل از K_s تفکیک کرده و این مقادارها را برای نقاط پتانسیلی صفر تا ۲۰۰ سانتی متر که محدوده تراکم نقاط برداشت شده می باشد نمایش دهیم، شکل هایی مشابه شکل ۴ خواهیم داشت. بر پایه این جداسازی، بهتر می توان در خصوص تاثیر جایگزینی K_0 به جای K_s اظهار نظر نمود.

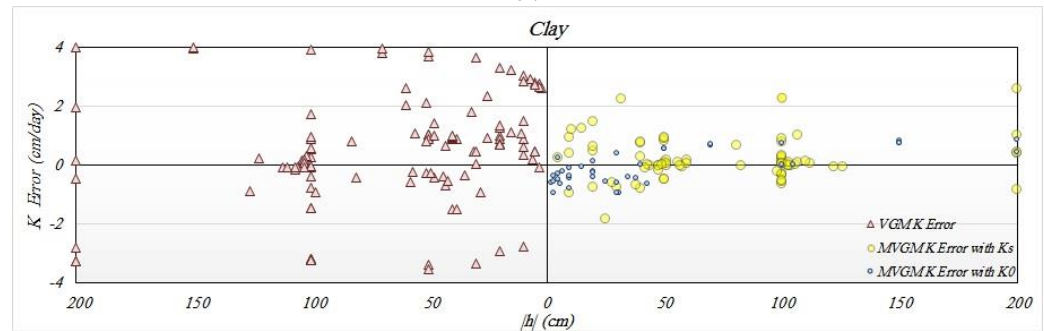
در جدول ۵، با در نظر گرفتن معیار مطلوبیت نزدیک تر بودن RMSE به صفر، در تمامی کلاس های بافتی، روش MVGM نسبت به روش VGM برتری داشته و در برآورد مقادارهای هدایت هیدرولیکی مطلوب تر عمل نموده است. همچنین، بر اساس معیار ارائه شده توسط موتوویلوو و همکاران و تقسیم بندی عملکرد خوب تا رضایت بخش مدل هیدرولوژیکی به ترتیب برای محدوده ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ مقدار NSE، عملکرد مدل MVGM برای کلاس لوم رضایت بخش و برای سایر دسته ها خوب توصیف می شود (Motovilov, 1999). با معیار قرار دادن محدوده های این شاخص، روش VGM از نظر کارایی، در کلاس های بافتی مختلف و همچنین



a.۴



b.۴



c.۴

شکل ۴- خطای برآورد هدایت هیدرولیکی در نقاط پتانسیلی صفر تا ۲۰۰ سانتی متر به دو روش VGМК و MVGM.

مقایسه با VGМК محدودتر بوده و این موضوع در شکل به وضوح دیده می‌شود.

در مجموعه شکل‌های ۴، اثر جایگزینی K_0 به جای K_s در صورت یکسان بودن خاک‌ها دیده نمی‌شود. جهت بررسی و تفکیک اثر این دو پارامتر، خاک‌هایی از بخش ایجاد مدل که هر دو مقدار K_s و K_0 برای آنها گزارش شده بود انتخاب شدند. در وضعیت اول، برآورد هدایت هیدرولیکی به روش MVGM با سه پارامتر \hat{h} ، \hat{n} و K_0 و در دومین حالت، برآوردها با سه پارامتر \hat{h} ، \hat{n} و K_s برای آنها محاسبه گردید تا نقش استفاده از پارامترهای K_0 و K_s در میزان خطای برآورد مشخص شود. نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی کننده خطا برای دو وضعیت ذکر شده در جدول ۶ ارائه شده است.

که در آن، نمایه‌های K_s و K_0 به ترتیب معرف خطای برآورد هدایت هیدرولیکی بر مبنای استفاده از K_0 و K_s در روش MVGM می‌باشد. شکل‌های ۴ (راست)، خطای برآورد هدایت هیدرولیکی را به روش MVGM نشان می‌دهند که در آن، خطای برآورد بر مبنای استفاده از K_s یا K_0 تفکیک شده است. در این شکل‌ها، تغییرات کمتر خطای برآورد هدایت هیدرولیکی روش MVGM در مقایسه با روش VGМК (شکل‌های ۴ - چپ) کاملاً مشهود بوده و تفرق کمتر و نزدیکتر بودن این نقاط به خط صفر خطا، عملکرد مطلوب‌تر MVGM را نشان می‌دهد. همچنین، روش MVGM، برای خاک‌هایی که در آنها از K_0 استفاده شده، برآوردهای مطلوب‌تری ارائه داده است. در مجموع، باند خطای برآورد روش MVGM (محدوده +۳ و -۳) در

جدول ۶- خطای برآورد هدایت هیدرولیکی روش‌های VGM و MVGM. برای خاک‌های دارای مقدار گزارش شده K_0

کلاس بافت	تعداد نقاط	روش	پارامترهای مدل	RMSE _K (cm/day)	کاهش خطا (%)
شن	۶۳۹	VGM	$K_s, l=0.5, n$	۱/۲۱۱	-
		MVGM	$K_0, \hat{l}=-1, \hat{n}$	۰/۶۶۰	۴۵/۵
لوم	۷۶۴	VGM	$K_s, l=0.5, n$	۲/۱۴۷	-
		MVGM	$K_0, \hat{l}=-3.5, \hat{n}$	۱/۰۷۷	۴۹/۹
رس	۱۱۵	VGM	$K_s, l=0.5, n$	۲/۹۵۵	-
		MVGM	$K_0, \hat{l}=-3, \hat{n}$	۱/۰۶۴	۶۴/۰
تمامی خاک‌ها	۱۵۱۸	VGM	$K_s, l=0.5, n$	۱/۹۴۳	-
		MVGM	$K_0, \hat{l}=-1.5, \hat{n}$	۰/۹۰۶	۵۳/۴
			$K_s, \hat{l}=-1.5, \hat{n}$	۱/۴۸۰	۲۳/۹

شده‌اند. در این شکل‌ها، فاصله بیشتر نقاط برآورد شده با روش VGM نسبت به خط مقایسه، در تمامی کلاس‌های بافت خاک مشهود است. به عکس، تفرق و پراکندگی کمتر نقاط برآورد شده با روش MVGM و نزدیک‌تر بودن آنها به خط یک به یک، نشان از برآوردهای مطلوب‌تر این روش دارد.

صحت‌سنجی روش

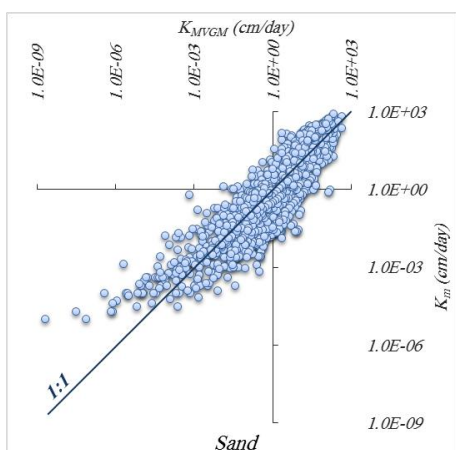
از آنجا که اختلاف عددی \hat{n} و \hat{n}_{opt} (تفاوت ضرایب به دست آمده از مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده و برازش داده‌های اندازه‌گیری شده $K-\theta$ در اهای منتخب) به تنهایی قادر به بیان مطلوبیت عملکرد مدل‌های ایجاد شده نمی‌باشد، بایستی نقش آنها در مقدار خطای برآورد هدایت هیدرولیکی مد نظر قرار گیرد. بدین منظور، نتایج مربوط به مقدار خطا و ارزیابی کارایی دو روش VGM و MVGM به ترتیب با دو شاخص RMSE_K و NSE_K در جدول ۶ ارائه شده است.

بر پایه نتایج جدول ۶، شاخص ارزیابی خطای RMSE_K در تمامی کلاس‌های بافتی و همچنین مجموع بافت‌ها، برای روش MVGM کمتر از VGM است که عملکرد مطلوب‌تر روش MVGM را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار NSE_K در روش MVGM، برای کلاس شن، لوم و مجموع خاک‌ها خوب و برای کلاس رس رضایت‌بخش است. این شاخص در روش VGM، برای کلاس شن و تمامی خاک‌ها در محدوده قابل پذیرش و برای کلاس‌های بافتی لوم و رس غیر قابل پذیرش می‌باشد. در مجموع، توجه به نتایج به دست آمده در دو بخش ایجاد مدل و اعتبارسنجی آن، در تمامی کلاس‌های بافتی، استفاده از روش MVGM ارجح بوده و عملکرد کلی آن در مقایسه با روش VGM بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.

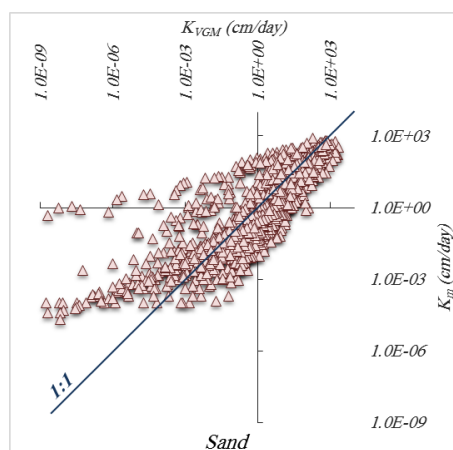
در جدول ۶، مقدارهای RMSE_K نشان می‌دهد که در تمامی کلاس‌های بافتی، زمانی که هر سه پارامتر l ، n و K_s با پارامترهای \hat{l} و \hat{n} جایگزین شده‌اند، مقدار خطای برآورد به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در بین پارامترهای جایگزین شده، K_0 بیشترین سهم را در کاهش خطای برآورد دارا می‌باشد. نقش این پارامتر در کاهش خطای برآورد در کلاس بافت رس بیش از سایر کلاس‌های خاک می‌باشد. از آنجا که وجود درز و ترک‌های احتمالی در خاک، احتمال وقوع خطا در اندازه‌گیری مقدار K_s را افزایش می‌دهد، انتخاب K_0 به جای K_s می‌تواند سبب بیش‌برآورد هدایت هیدرولیکی شده و خطا را افزایش دهد. این موضوع، در دو پژوهش دکستر و همچنین امامی و همکاران نیز مورد بررسی قرار گرفته و به خطای برآورد هدایت هیدرولیکی در شرایط استفاده از K_s اشاره شده است (امامی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Dexter, 2004). بنابراین، با توجه به حساسیت بیشتر این کلاس بافتی، استفاده از K_0 به جای K_s توصیه می‌شود. مقدار تاثیر دو پارامتر \hat{l} و \hat{n} نیز در کاهش خطای برآورد تمامی کلاس‌های بافتی قابل توجه بوده و نشان می‌دهد که چنانچه تنها این دو پارامتر اصلاح شوند، همچنان انتظار می‌رود که نسبت به شرایط استفاده از l و n ، عملکرد مطلوب‌تری در برآورد هدایت هیدرولیکی به دست آید.

مقایسه دیداری مقدارهای برآورد شده هدایت هیدرولیکی به روش‌های VGM و MVGM

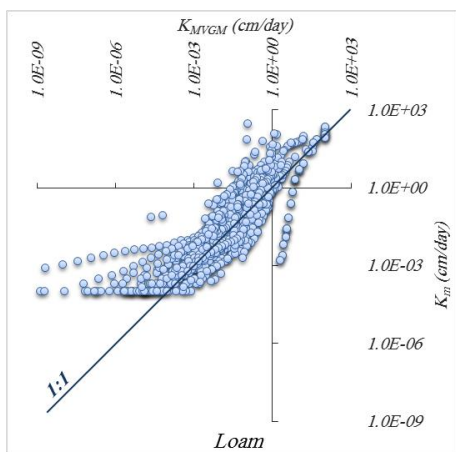
در این بخش، در مجموع شکل‌های ۴، مقدارهای اندازه‌گیری و برآورد شده هدایت هیدرولیکی با دو روش VGM و MVGM، بر مبنای داده‌های بخش ایجاد مدل نسبت به خط ۱:۱ رسم شده و مقدارهای نزدیک به صفر (کوچکتر از 10^{-9} سانتی‌متر) کنار گذاشته



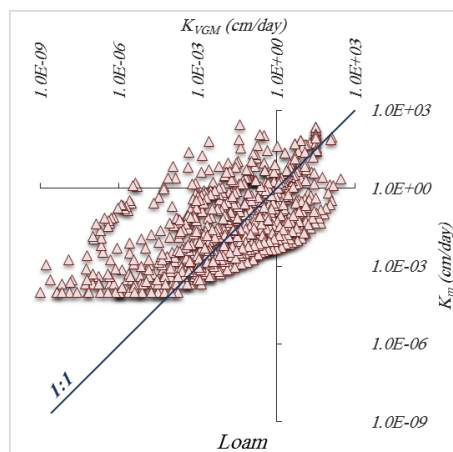
b.Δ



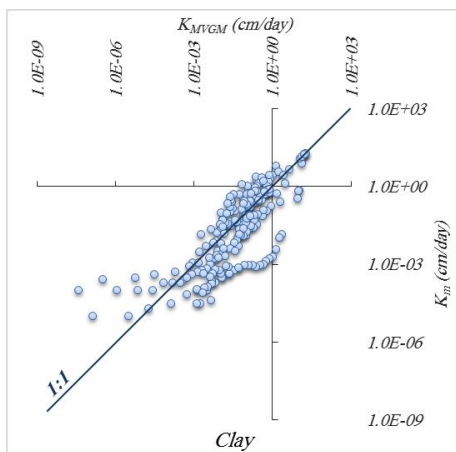
a.Δ



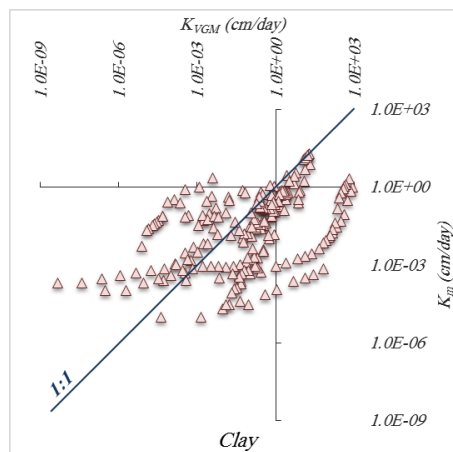
d.Δ



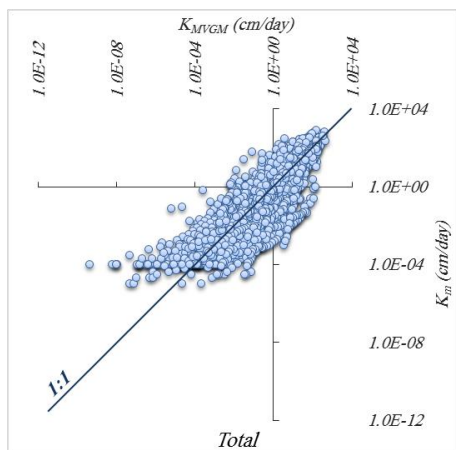
c.Δ



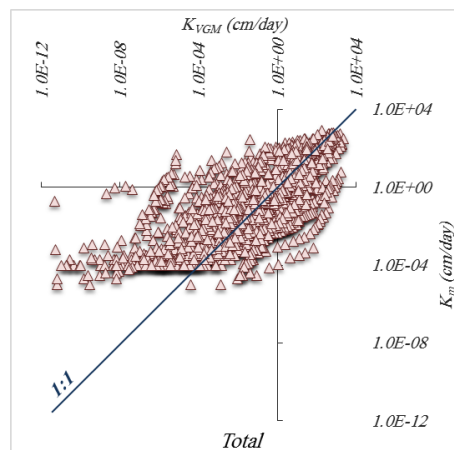
f.Δ



e.Δ



h.۵



g.۵

شکل ۵- مقایسه مقدارهای اندازه‌گیری شده و برآورد شده هدایت هیدرولیکی

K_m : هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده؛ K_{VGM} : هدایت هیدرولیکی برآورد شده با VGM؛

K_{MVGM} : هدایت هیدرولیکی برآورد شده با MVGM

جدول ۶- مقدار خطا و ارزیابی عملکرد روش‌های VGM و MVGM برای خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی

MVGM			VGM			تعداد نقاط	کلاس بافت
NSE_K	$RMSE_K$ (cm/day)	پارامترها	NSE_K	$RMSE_K$ (cm/day)	پارامترها		
۰/۷۳۴	۰/۸۵۰	$K_{sc}, \hat{l}=-1, \hat{n}$	۰/۶۴۱	۰/۹۸۷	$K_s, l=0.5, n$	۴۲۷	شن
۰/۵۵۳	۰/۷۷۶	$K_{sc}, \hat{l}=-3.5, \hat{n}$	۰/۷۴۴	۱/۵۳۳	$K_s, l=0.5, n$	۴۷۱	لوم
۰/۴۳۸	۱/۰۶۰	$K_{sc}, \hat{l}=-3, \hat{n}$	۱/۴۸۲	۱/۷۵۷	$K_s, l=0.5, n$	۷۳	رس
۰/۷۰۴	۰/۸۲۹	$K_{sc}, \hat{l}=-1.5, \hat{n}$	۰/۳۸۴	۱/۱۹۷	$K_s, l=0.5, n$	۹۷۱	تمامی بافت‌ها

مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجله علوم آب و خاک. ۵۹: ۱۸۲-۱۶۹.

شیاسی ارانی، م. قهرمان، ب. امامی، ح. و داوری، ک. ۱۴۰۰. برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن - معلم با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک. نشریه علمی پژوهش‌های خاک. ۴: ۳۹۶-۳۸۱.

Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. Transaction of AIME. 5(3): 71-78.

Carman, P.C. 1937. Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of Chemical Engineers, London. 15:150-166.

Carsel, R.F. and Parrish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research. 24:755-769.

Child, E.C. and George, C. 1950. The permeability of porous material. Proceedings of the Royal Society. A. 201:392-405.

Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part III:

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی با عنوان MVGM جهت برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بر مبنای روش کلاسیک VGM پیشنهاد گردید. در روش پیشنهادی، هدایت هیدرولیکی متناظر با پتانسیل صفر (K_s) با مقدار هدایت هیدرولیکی اصلاح شده (K_{sc}) جایگزین گردید. همچنین، به بهینه‌سازی هم‌زمان دیگر پارامترهای مدل VGM نظیر l و n پرداخته شد و برای هر کلاس بافتی، مقداری مختص برای l معرفی و تابعی انتقالی برای برآورد ضریب توزیع اندازه منافذ رابطه $K-\theta$ مدل VGM ایجاد گردید. مقایسه عملکرد هر دو روش با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی کننده خطا و کارایی مدل‌ها نشان داد که در هر دو بخش ایجاد توابع انتقالی و صحت‌سنجی، روش MVGM در مقایسه با VGM عملکرد مطلوب‌تری دارد.

منابع

امامی، ح. شرفا، م. و نیشابوری، م. ۱۳۹۱. ارزیابی هدایت هیدرولیکی نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به عنوان مرجع در برخی

92507. USA.
- Peters, A. 2013. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research*. 49 (10), 6765–6780.
- Schaap, M.G. Leij, F.J. and van Genuchten, M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. 62:847–855.
- Schaap, M.G. and F.J Leij. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*. 64:843–851.
- Schaap, M.G. Leij, F.J. and van Genuchten, M.Th. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251:163–176.
- Schaap, M.G. and van Genuchten, M.T. 2005. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*. Vol 5:27–34.
- Shirazi, M. A. and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*. 48:142–147.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media, *Physics*, I, 318–333.
- Tamari, S. Bruckler, L. Halbertsma, J. and Chadoeuf, J. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 642–651.
- Twarakavi, N.K.C. Saito, H. Simunek, J. and van Genuchten, M.Th. 2008. A new approach to estimate soil hydraulic parameters using only soil water retention data. *Soil Science Society of America Journal*. 72:471–479.
- Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44:892–898.
- Van Genuchten, M.T. and D.R. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*. 3(5): 615–628.
- Vereecken, H. 1995. Estimating the unsaturated hydraulic from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*. 65:81–92.
- Verma, P. Singh, P. George, K.V. Singh, H.V. Devotta, S. and Singh, R.N. 2009. Uncertainty analysis of transport of water and pesticide in an unsaturated layered soil profile using fuzzy set theory. *Applied Mathematical Modelling*. 33:770–782.
- Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120:227–239.
- Garey, A.F. Derek, M.H. Glenn, V.W. Eddy, J.L. Amanda, K.F. and Maria, L.C. 2010. Numerically predicting seepage gradient forces and erosion: Sensitivity to soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*. 389: 354–362.
- Gholami, A. Kreinovich, V. and Kosheleva, O. 2018. Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation. *Departmental Technical Reports (CS)*. 1–6.
- Kaveh, F. and van Genuchten, M.Th. 1992. A further look at a new unsaturated hydraulic conductivity equation. *Iran. Journal of Agricultural Science*. 23:24–32.
- Kong, J. Shen, C. Luo, Z. Hua, G. and Zhao, H. 2016. Improvement of the hillslope-storage Boussinesq model by considering lateral flow in the unsaturated zone. *Water Resources Research*. 52(4): 2965–2984.
- Kosugi, K. 1999. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:270–277.
- Kozeny, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Akad. Wiss. Wien*. 136(2a): 271–306.
- Lin, F. Xingwei, C. and Huaxia, Y. 2017. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT. *Journal of Hydrology*. 22(11).
- Lu, H.G. Zhao, Z. Zhao, H. and Li, L. 2019. Evaluation and application of the modified van Genuchten function for unsaturated porous media. *Journal of Hydrology*. 571(2):279–287.
- McCuen, R.H. Knight, Z. and Cutter, A.G. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*. 11 (6): 597–602.
- Motovilov, Y. G. Gottschalk, L. England, K. and Rodhe, A. 1999. Validation of distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 98–99:257–277.
- Mualem, Y. 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 12:513–522.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10:282–290.
- Nemes A. Schaap, M. and Leij, F.J. 1999. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database Version 2.0. U.S. Salinity Laboratory Riverside CA

Uptake Model. Soil Science Society of America
Journal. 65: 1027-1037.

Vrugt, J.A. Hopmans, J.W. and Simunek, J. 2001.
Calibration of a Two-Dimensional Root Water

Estimation of Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity based on Van Genuchten-Mualem Model Parameters Modification

M. Shiasi Arani¹, H. Emami^{2*}, B. Ghahraman³, K. Davari⁴

Received: Aug.27, 2022

Accepted: Dec.17, 2022

Abstract

In order to predict the behavior of soil-related phenomena, it is necessary to have knowledge about unsaturated flow and using models that provide optimal estimates of the retention curve and hydraulic conductivity of soils. Despite the widespread use of the classic van Genuchten-Mualem model (VGM), this model usually performs poorly in predicting hydraulic conductivity and modification of some of its parameters seems necessary. In this research, 283 soils from different textures of the UNSODA bank were selected and divided into two sections of calibration and validation and their soil parameters were exported and categorized. Then, by defining the modified unsaturated hydraulic conductivity (K_{sc}) instead of the saturated hydraulic conductivity (K_s) and determining the limits for l and n parameters, the hydraulic conductivity-moisture function of VGM were solved using 24600 pairs of points l_i and n_j for each soil of the three main soil texture classes. In the following, the optimal l value (\hat{l}) of each texture class was selected based on the minimum value of the hydraulic conductivity estimation error using the root mean square error (RMSE) index and the n values that had created the minimum errors, were selected as the optimal pore size distribution coefficients of the hydraulic conductivity-moisture function (\hat{n}_{opt}). In order to create pedotransfer functions for estimating \hat{n}_{opt} , we ran stepwise regression in MATLAB software considering the condition of statistical significance (P -value=0.05) for independent variables and functions for each soil texture class. After creating pedotransfer functions, the results of the proposed method of this research (MVGGM) were compared with the VGM results using RMSE and Nash-Sutcliffe (NSE) indices. The results showed that in both sections of creation and validation functions, the MVGGM performed better in estimating hydraulic conductivity and had a higher efficiency index in all textural classes of soil.

Keywords: Unsaturated hydraulic conductivity, Pedotransfer functions, van Genuchten model, Shape factor, Soil water retention curve

1- Ph. D Candidate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*-Corresponding author Email: hemami@um.ac.ir)