

برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی مدل ون گنوختن - معلم با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک

مجتبی شیاسی ارانی¹، بیژن قهرمان¹، حجت امامی و کامران داوری

کاندید دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ m.shiasi@mail.um.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ bijangh@um.ac.ir

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ hemami@um.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ k.davary@um.ac.ir

دریافت: 1400/5/31 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

برای پژوهش در زمینه‌ی جریان غیر اشباع در خاک، داشتن توابعی هیدرولیکی که در پیش‌بینی منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی خاک دارای عملکرد مطلوبی باشند، برای پژوهش در زمینه‌ی جریان غیر اشباع در خاک ضروری است. در این پژوهش، ابتدا با انتخاب 8 خاک از بافت‌های مختلف بانک UNSODA، به بررسی صحت ضریب شکل بهینه خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش (n) مدل ون گنوختن - معلم (VGM) در پیش‌بینی مقدار هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در رطوبت‌های مختلف بررسی شد. با توجه به نتایج ضعیف حاصل از پیش‌بینی این مدل و نیاز به بررسی ضریب شکل جداگانه‌ای همچون (\hat{n}) برای رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت ($K-\theta$) مدل VGM، 24 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف UNSODA انتخاب و پارامترهای اندازه‌گیری شده‌ی آنها، به منظور یافتن تابع انتقالی مناسب در برآورد \hat{n} به روش تحلیل رگرسیون مورد تحلیل قرار گرفت. رابطه‌ی ایجاد شده، ارتباط (\hat{n}) را با دو پارامتر رطوبت اشباع (θ_s) و مقدار ماده آلی خاک با دارا بودن ضریب همبستگی ($r=0.745$) و معنی‌داری آماری ($P\text{-value}=0.0005$) تایید نمود. همچنین، برای صحت‌سنجی تابع انتقالی ایجاد شده، مقدارهای ($K-\theta$) اندازه‌گیری شده برای 8 خاک منتخب بخش صحت‌سنجی با مقادیر محاسباتی K حاصل از ضریب شکل تابع انتقالی (\hat{n}) و نرم‌افزار RETC (n) مقایسه شد. مقدار شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطای مدل ($RMSE_{\hat{n}}$) و ضریب کارآیی نش‌ساتکلیف (NSE) نشان داد که استفاده از ضریب شکل تابع انتقالی ایجاد شده در این پژوهش در مقایسه با نرم‌افزار RETC، عملکرد مطلوب‌تری در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع داشت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، جریان غیر اشباع، ضریب شکل، منحنی مشخصه رطوبت خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: مشهد - دانشگاه فردوسی - دانشکده کشاورزی - گروه مهندسی آب

مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مسائل در علوم مختلف مرتبط با خاک، شناسایی وضعیت جریان و رفتار آب در خاک است. بسته به وضعیت ذاتی هر خاک از نظر بافت و ساختمان، حرکت آب در آن متفاوت بوده و این موضوع می‌تواند بر پدیده‌ها و شرایط مختلف همچون کشاورزی، نشت از یک سد خاکی، استخراج از یک معدن و... اثرگذار باشد. عوامل پرشماری در تعیین نحوه رفتار جریان آب در خاک موثرند. پی بردن به وضعیت حرکت آب در خاک غیر اشباع، به داشتن آگاهی از منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع آن خاک بستگی دارد (تاماری و همکاران، 1993).

برای پیش‌بینی رفتار پدیده‌ای که با خاک مرتبط است، آگاهی از رفتار آب در خاک ضروری می‌باشد. متداول‌ترین روش شبیه‌سازی رفتار جریان آب در خاک غیر اشباع، استفاده از معادله ریچاردز (ریچاردز، 1931) است که در آن، حرکت آب در محیط غیرهمروند خاک، به صورت چند بعدی شبیه‌سازی می‌شود. معادله ریچاردز ترکیبی از معادلات دارسی و پیوستگی است که در حالت جریان یک‌بعدی، به صورت رابطه‌ی 1 نوشته می‌شود:

(1)

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

که در آن، θ درصد رطوبت حجمی خاک، h مکش آب خاک، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک به عنوان تابعی از مکش، 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 دامنه‌ای از مکش‌های کم تا زیاد نیاز است. بر خلاف رطوبت خاک، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع، علاوه بر نیاز به تجهیزات خاص، کاری سخت و زمان‌بر و برای مقیاس‌های بزرگ غیرعملی است (شپ و ون گنوختن، 2005). از این رو،

پژوهش‌گران همواره به دنبال یافتن و توسعه‌ی راهکارهای جایگزین روش اندازه‌گیری جهت برآورد پارامترهای معادله ریچاردز هستند.

مدل‌های فراوانی برای تخمین ورودی‌های لازم جهت حل معادله ریچاردز (مقادیر رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های مختلف خاک) توسعه یافته‌اند (بروکس و کوری، 1964؛ ون گنوختن و معلم، 1980؛ کوزوگی، 1996؛ واراکای و همکاران، 2006؛ سونگ بو و همکاران، 2020). برای تخمین پارامترهای این مدل‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آنها، به کارگیری PTF^1 ها یا توابع انتقالی است. این مفهوم، نخستین بار به منظور بیان وابستگی بین منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی با پارامترهای اساسی خاک ارائه گردید (بوما، 1989). این توابع قادر هستند برخی از پارامترهای دیریافت خاک نظیر رطوبت یا هدایت هیدرولیکی را با استفاده از پارامترهای زود یافت همچون چگالی ظاهری، درصد ذرات معدنی، ماده آلی و... به کمک رابطه‌ی ریاضی مناسب تخمین بزنند.

دو نوع متمایز از توابع انتقالی وجود دارد. توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک. توابع انتقالی نقطه‌ای می‌توانند مقدار یک پارامتر را در نقطه پتانسیلی خاصی تخمین بزنند (پوکت و همکاران، 1985؛ کاستلینی و یوونو، 2019؛ حق‌وردی و همکاران، 1389). در حالی که توابع انتقالی پارامتریک، پارامترهای عملکرد را به نحوی تخمین می‌زنند که منعکس‌کننده‌ی وضعیت داده‌های مشاهداتی در طیف وسیعی از مکش‌های مختلف باشد (مک کوئن و همکاران، 1981؛ کوزبی و همکاران، 1984؛ وستن و ون گنوختن، 1989؛ وریکن و همکاران، 2010، کاستلینی و یوونو، 2019).

همچنین، برای استخراج و توسعه‌ی توابع انتقالی سه روش کلی وجود دارد. در روش اول، استخراج تابع با تکنیک‌های رگرسیون آماری انجام می‌گیرد و هدف، پیش‌بینی یک یا چند متغیر وابسته با استفاده از یک یا چند

¹ Pedotransfer Functions

که در آنها θ_s رطوبت اشباع خاک (حجمی)، θ_r رطوبت باقیمانده در پروفیل خاک (حجمی)، K_s هدایت آبی اشباع، n و α ضرایب تجربی معادله و l ، بعنوان پارامتر شکل و منعکس کننده اثر اعوجاج و اتصال منافذ بوده و مقدار بهینه آن بر اساس مطالعات انجام شده توسط تعدادی از پژوهش‌گران 0/5 گزارش شده است (معلم، 1976، شپ و همکاران، 1998).

در راستای یافتن روش‌های جایگزین اندازه‌گیری پارامترهای مدل *VGM*، وریکن و همکاران (1989) و همچنین وستن و همکاران (1999)، روابطی را به روش تحلیل رگرسیون، جهت تخمین پارامترهای θ_s ، θ_r ، n و α ارائه نمودند. همچنین، پژوهشی توسط وستن و همکاران (1999) به روش تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده زود یافت خاک جهت تخمین پارامترهای این مدل شامل θ_s ، n و α انجام شده است. همچنین، نرم‌افزار *ROSETTA* می‌تواند در صورت در دسترس بودن یک یا چند ویژگی خاک نظیر بافت، درصد ذرات، چگالی ظاهری، درصد رطوبت در نقاط پتانسیلی خاص و... پارامترهای خاک نظیر K_s ، θ_s ، θ_r ، n و α را به نحوی نسبتاً مناسب تخمین بزند (شپ و همکاران، 2001). با در اختیار داشتن مقادیر برآورد شده‌ی پارامترهای خاک، می‌توان منحنی رطوبتی خاک را بر پایه‌ی مدل‌های ون‌گونختن و بروکس - کوری و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع را بر اساس مدل‌های بوردین و معلم با استفاده از نرم‌افزار *RETIC* شبیه‌سازی نمود (ون‌گونختن، 1991؛ یاتس و همکاران، 1992). اما هنگامی که فقط داده‌های مشاهداتی مربوط به منحنی مشخصه در اختیار است، در برخی مواقع، *RETIC* ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک را ضعیف تخمین می‌زند (شپ و همکاران، 2000؛ شپ و همکاران، 2001؛ شپ و ون‌گونختن، 2006؛ واراکوی و همکاران، 2008). با توجه به این ضعف، در پژوهشی که توسط شپ و همکاران (2000) بر روی 235 خاک انجام شد، روشی بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی ارائه گردید که در آن، با منظور نمودن K_0 به جای K_s

متغیر مستقل است (وستن و همکاران، 1999؛ میناسنی و همکاران، 1999؛ مردون و همکاران، 2006). روش دوم شامل تکنیک‌های کاوش داده‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد (شپ و همکاران، 1999؛ نمس و همکاران، 2006؛ بیکر و الیسون، 2008؛ حق‌وردی و همکاران، 1389). اگرچه توابع انتقالی حاصل از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، عملکرد به نسبت مطلوبی دارند، اما تغییرات اندک در داده‌های آموزشی این مدل‌ها، ممکن است باعث کاهش کارایی مدل شود (کارنی و کانینگهام، 1999). روش سوم توسعه یافته در سال‌های اخیر، به روش شبه پارامتریک عصبی مشهور است (حق‌وردی و همکاران، 2012؛ سینگ و همکاران، 2020). در این روش، توابع انتقالی علاوه بر نشان دادن عملکردی پیوسته از منحنی رطوبتی، نیازی به استفاده از معادلات نگهداشت آب خاک (همانند معادله ون‌گونختن) ندارد.

برکاربردترین مدل در بین مدل‌های ارائه شده برای برآورد پارامترهای مورد نیاز معادله ریچاردز، مدل ون‌گونختن - معلم (که در این مقاله به اختصار مدل *VGM* نامیده می‌شود) می‌باشد. به دلیل مطالعات فراوان انجام شده بر روی مدل *VGM*، این مدل به معیاری استاندارد برای محاسبه و مقایسه پارامترهای خاک تبدیل شده است (واراکوی و همکاران، 2008). در مدل *VGM*، از روابط 2 و 3 به ترتیب برای بیان وابستگی رطوبت به مکش و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به مکش استفاده می‌شود:

(2)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2, \quad m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

منظور گردید. به دلیل واجد شرایط نبودن تعداد خاک بیشتر (محدود بودن داده‌های اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی - رطوبت)، انتخاب تعداد خاک بیشتر میسر نبود. در انتخاب خاک‌ها شرایط ویژه‌ای به شرح زیر منظور شد:

الف - خاک‌ها از سه کلاس بافتی مختلف شن، لوم و رس و به تعداد مساوی از هر کلاس انتخاب شدند.

ب - از هر محل آزمایش، تنها یکی از نمونه‌ها انتخاب شد تا وجود دو یا چند نمونه خاک از یک محل، منعکس‌کننده خواص ویژه‌ای از خاک منطقه‌ی برداشت نمونه در برآورد ضریب شکل نباشد.

پ - خاک منتخب، دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده‌های رطوبت - مکش اندازه‌گیری شده، در محدوده‌ی رطوبت اشباع تا باقی‌مانده (مکش صفر تا 15000 سانتی‌متر) بود. کمترین تعداد مقادیر نقاط متناظر برداشت شده رطوبت - مکش در بین خاک‌های منتخب 8 و بیشترین تعداد برداشت 50 نقطه می‌باشد.

ت - خاک منتخب، دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده‌های هدایت هیدرولیکی - رطوبت در محدوده وسیعی از رطوبت (مکش) بود تا بتوان تابع انتقالی ایجاد شده را نیز بعنوان پیش‌گوی مطلوبی برای طیف وسیعی از مکش‌ها مورد استفاده قرار داد. کمترین تعداد مقادیر نقاط متناظر برداشت شده هدایت هیدرولیکی - رطوبت در بین خاک‌های منتخب 5 و بیشترین تعداد برداشت 50 نقطه می‌باشد.

ث - کلیه خاک‌های منتخب دارای پارامترهای اندازه‌گیری شده درصد رطوبت اشباع، چگالی ظاهری، درصد ذرات معدنی (شن، سیلت و رس) و مقدار ماده آلی به عنوان متغیرهای مستقل (پیش‌گو) جهت بررسی وجود رابطه‌ی رگرسیونی با متغیر وابسته \hat{n} بودند.

ج - اطلاعات تمامی خاک‌ها از شاخه خشک شدن منحنی مشخصه (گذر از خیسبی به خشکی) برداشت گردید.

$(K_0 < K_s)$ و بهینه‌سازی هم‌زمان l و K_0 برآوردهای مطلوب‌تری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقایسه با مدل کلاسیک VGM ($l=0.5$)، حاصل شد و در مقیاس کلی نمونه‌ها، $(l=-1)$ به عنوان مقدار بهینه گزارش گردید. همچنین، جهت بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مدل VGM ، کونگ و همکاران (2016) تابعی مشابه با تابع $\theta-h$ ارائه کردند که در آن، ضریب شکل مجزایی برای تابع $K-\theta$ به صورت $m_2 = 1 - 1/n_2$ و $n_1 \neq n_2$ بر پایه‌ی برازش داده‌ها بر توابع VGM بدست آمد (n_1 ضریب شکل تابع $\theta-h$ و n_2 و m_2 ضریب شکل تابع $K-\theta$ مدل VGM). همچنین، لو و همکاران (2019)، با برازش داده‌های منحنی مشخصه 27 خاک و معیار قرار دادن شاخص آماری ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، تابعی چند جمله‌ای را برای برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی (n_2) مدل VGM ارائه نمودند که در آن n_2 تابعی از n_1 و α بود. از آنجا که ارتباط پارامترهای فیزیکی خاک در برآورد ضریب شکلی مجزا برای تابع $K-\theta$ مورد بررسی قرار نگرفته است، در این مطالعه دو هدف توسط پژوهش‌گران دنبال شده است. دنبال می‌شود. هدف اول مقایسه میزان تطابق ضرایب شکل (n) بدست آمده از رابطه‌ی $\theta-h$ و $K-\theta$ مدل VGM بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده و بررسی امکان استفاده از ضریب شکل حاصل از داده‌های منحنی مشخصه برای بدست آوردن برآوردی مطلوب از هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در مکش‌های مختلف است. هدف دوم، توسعه‌ی تابعی جهت برآورد دقیق‌تر ضریب شکل رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت (\hat{n}) بر پایه روش تحلیل رگرسیون مد نظر می‌باشد.

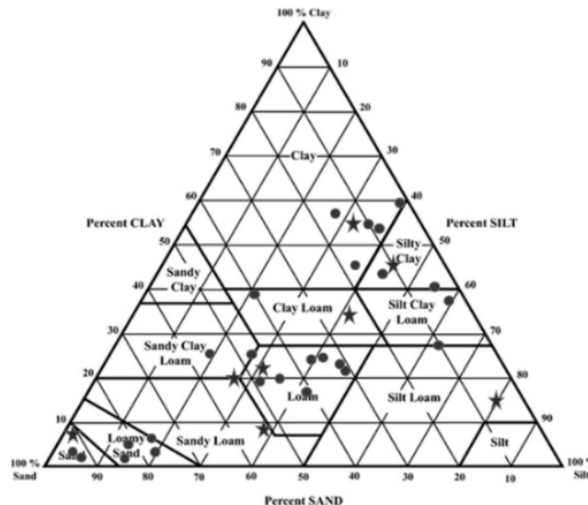
مواد و روش‌ها

جهت انجام این پژوهش از داده‌های بانک خاک $UNSODA^2$ استفاده شد. ابتدا، 32 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف انتخاب شدند. از این تعداد، 24 خاک برای بخش توسعه‌ی روش و 8 خاک جهت صحت‌سنجی

¹ UNSaturated SOil hydraulic DATAbase

همچنین، در جدول شماره 1، مشخصات کلی خاک‌های منتخب از بانک خاک ارائه شده است.

شکل شماره 1، توزیع بافت‌های خاک‌های منتخب را بر روی مثلث خاک، بر اساس طبقه‌بندی USDA نشان می‌دهد.



شکل 1- توزیع بافت‌های منتخب بر روی مثلث خاک. نقاط ستاره شکل: 8 خاک مورد استفاده جهت بررسی کارایی ضریب شکل نرم‌افزار RETC؛ نقاط دایره شکل: خاک‌های مورد استفاده در بخش واسنجی

جدول 1- ویژگی‌های کلی خاک‌های انتخابی از بانک خاک UNSODA

متغیر	رطوبت اشباع (m^3/m^3)	چگالی ظاهری (kg/m^3)	ماده آلی			شن	سیلت	رس
			2/129	1/419	0/138			
میانگین	0/467	1335	2/129	1/419	0/138	40/1	32/7	27/2
انحراف معیار	0/08	195	1/419	1/419	0/138	29/2	14/9	18/4
مقدار کمینه	0/362	840	0/138	1/419	0/138	1/9	3/5	1/5
مقدار بیشینه	0/667	1640	4/9	1/419	0/138	93/0	61/8	58/1

(رابطه 2) ثبت گردید. همچنین، مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر هدایت هیدرولیکی - رطوبت، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای معادله‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت مدل VGM (رابطه‌ی 3) برازش داده شد و مقدار ضریب شکل بهینه (\hat{n}) به عنوان نتیجه‌ی رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت استخراج گردید.

توسعه مدل و تحلیل رگرسیون جهت برآورد (\hat{n}) مدل رگرسیون خطی به صورت رابطه‌ی 5 تعریف می‌شود:

از بین خاک‌های منتخب، 8 خاک از بافت‌های مختلف (که در شکل شماره 1 با ستاره مشخص شده‌اند) به صورت تصادفی انتخاب شد تا فرض امکان استفاده از ضریب شکل n برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع به عنوان هدف اول مطالعه بررسی شود. سپس، داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به هر خاک شامل θ_r ، θ_s و مقادیرهای متناظر رطوبت - مکش دسته‌بندی و به عنوان ورودی به نرم‌افزار RETC وارد و ضریب شکل این مدل (n) به عنوان ضریب شکل رابطه‌ی رطوبت - مکش

مقدار این آماره به صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده عملکرد مطلوب تر مدل در شبیه سازی است. $RMSE$ به صورت رابطه ی 6 تعریف می شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{m}} \quad (6)$$

که در آن، $\log_{10}(K_i)$ لگاریتم مقدار اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی در مکش i ام، $\log_{10}(\hat{K}_i)$ لگاریتم مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی متناظر با مکش i ام و m ، تعداد مشاهدات می باشد.

همچنین، از ضریب بازدهی مدل نش ساتکلیف (NSE^2) که از آن در ارزیابی عملکرد مدل های هیدرولوژیکی استفاده می شود، برای مقایسه کارایی نرم افزار RET_C و مدل ایجاد شده در این پژوهش استفاده شد. مقدار این شاخص از منهای بی نهایت تا یک تغییر می کند و هر چه به یک نزدیک تر باشد، نشان از عملکرد بهتر مدل دارد (ریتر و همکاران، 2013). در رابطه ی 7، معادله ی ضریب نش ساتکلیف ارائه شده است.

$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\bar{K}))^2}} \quad (7)$$

که در آن، $\log_{10}(K_i)$ لگاریتم مقدار اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی در مکش i ام، $\log_{10}(\hat{K}_i)$ لگاریتم مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی متناظر با مکش i ام و $\log_{10}(\bar{K})$ ، لگاریتم متوسط مقدار مشاهدات می باشد.

نتایج و بحث

برای بررسی میزان تطابق منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت در دو وضعیت اندازه گیری و شبیه سازی شده توسط نرم افزار RET_C ، مقدارهای هدایت هیدرولیکی نسبی در مقابل رطوبت نسبی برای 4 کلاس بافت مختلف در شکل شماره 2 رسم گردید. شکل ها نشان می دهند که

(5)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, k$$

که در آن، Y_i متغیر وابسته، β_0 عرض از مبدا، β_i ضرایب مدل رگرسیون، ε_i خطای مدل رگرسیون و k تعداد متغیرهای مستقل است. برای بررسی آزمون معنی دار بودن مدل رگرسیون، فرضیه ی $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ در برابر حداقل یک $\beta_j \neq 0$ آزمون شده و سپس، مقدار محاسبه شده F^* با مقدار متناظر در جدول توزیع فیشر مقایسه بر اساس سطح اطمینان مورد نظر $(1 - \alpha)\%$ مورد مقایسه قرار می گیرد.

به منظور بررسی نحوه ی ارتباط متغیرهای مستقل خاک با ضریب شکل معادله هدایت هیدرولیکی - مکش (\hat{n})، ویژگی های ذکر شده در جدول 1 برای خاک های منتخب دسته بندی و روش رگرسیون گام به گام در نرم افزار $MATLAB$ اجرا شد. همچنین، از آنجا که در این پژوهش، نقش (n) نیز در برآورد (\hat{n}) مورد بررسی قرار می گیرد، مقادیر خروجی این پارامتر نیز به همراه دیگر متغیرهای مستقل خاک وارد شد تا ارتباط احتمالی آن با متغیر وابسته (\hat{n}) بررسی شود. پس از آن، دقت اولیه مدل با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، ضریب تعیین و سایر پارامترهای آماری کنترل گردید.

صحت سنجی مدل

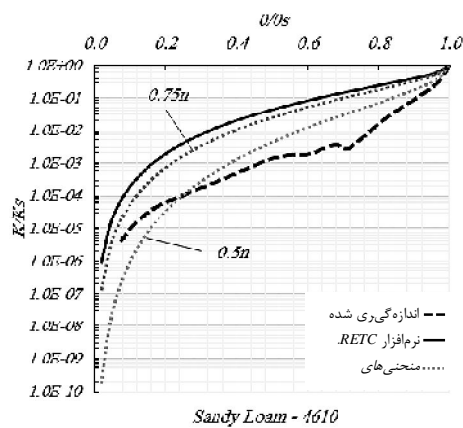
پس از توسعه هر مدل، بایستی میزان صحت نتایج آن مورد ارزیابی قرار گیرد. زمانی یک تابع انتقالی قابل اعتماد است که در هنگام صحت سنجی، از داده هایی خارج از موارد به کار گرفته شده در توسعه مدل استفاده شود (وستن و همکاران، 2001؛ پاتیل و همکاران، 2010). در این پژوهش، میزان صحت مدل رگرسیونی توسعه یافته بر روی 6 خاک منتخب بررسی شد. بررسی ها نشان می دهد که شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا یا $RMSE^1$ یک شاخص موفق در بررسی میزان خطا می باشد (جانا و همکاران، 2011؛ پاتیل و همکاران، 2012). هر چه

² Nash-Sutcliffe

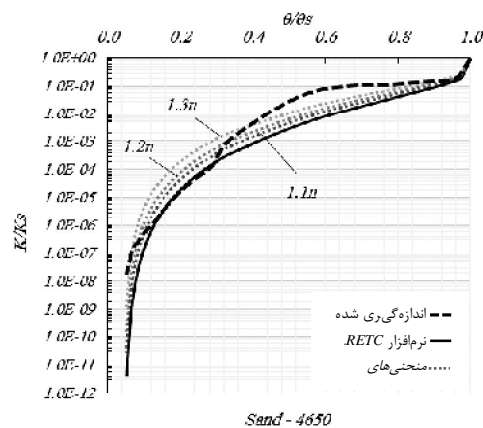
¹ Root Mean Square Error

هیدرولیکی - رطوبت، دارای تطابق ظاهری بیشتر و تحذب نسبتاً همسان می‌باشند. با سنگین‌تر شدن بافت خاک، شکل منحنی هدایت هیدرولیکی از تحذب به تقعر تغییر وضعیت می‌دهد (شکل‌های 2 - ج و 2 - د) که دلیل آن، مربوط به ماهیت رفتاری خاک‌های دارای بافت سنگین‌تر برای حفظ رطوبت بیشتر با افزایش مکش می‌باشد.

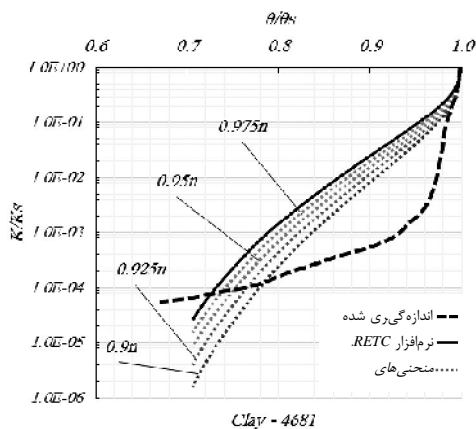
انتخاب ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، اختلاف (خطای) نسبتاً زیادی ایجاد نموده است. این اختلاف در بعضی خاک‌ها، به صورت بیش‌برآورد و در برخی دیگر به صورت کم‌برآورد مشهود است. علاوه بر این، بررسی ظاهری این چهار گراف نشان می‌دهد که در خاک‌های دارای بافت سبک‌تر (شکل‌های 2 - الف و 2 - ب)، منحنی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده هدایت



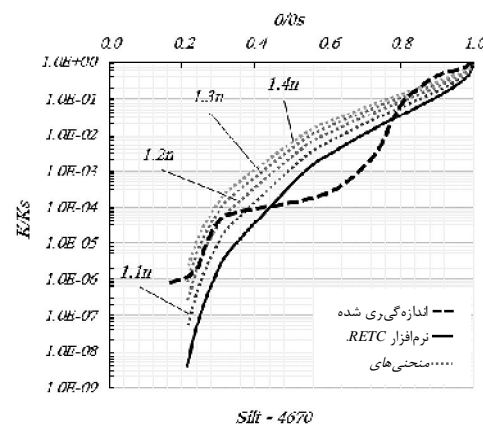
ب - 1



2 - الف



2 - د



2 - ج

شکل 2- نمودار مقادیر هدایت هیدرولیکی نسبی (K/Ks) در مقابل رطوبت نسبی (θ/θ_s) در دو وضعیت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در مقیاس نیمه‌لگاریتمی برای 4 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف. منحنی‌های خاکستری رنگ نقطه‌چین، تغییرات منحنی شبیه‌سازی شده را در جهت کاهش خطا، با افزایش (یا کاهش) مقدار n نشان می‌دهند.

منحنی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، به ضریبی اصلاحی همچون β نیاز است تا مقدار خطای بین دو منحنی را کمینه کند ($\hat{n} = \beta n$). برای مثال، در شکل 2 - الف که مربوط به خاک شنی می‌باشد، منحنی هدایت

در شکل 2، استفاده از ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش (n) در برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت سبب شده تا نرم‌افزار RETC نتواند تخمین مطلوبی از شرایط واقعی ارائه دهد. برای تطابق بیشتر

انتخاب و ضرایب n و \hat{n} به ترتیب با نرم‌افزار *RETC* و نرم‌افزار *MATLAB* برای آنها محاسبه شد. بر مبنای نتایج حاصل از این محاسبات (جدول 2)، در 75 درصد نمونه خاک‌ها، مقدار متوسط ضریب شکل مربوط به معادله هدایت هیدرولیکی - رطوبت، از ضریب شکل خروجی معادله رطوبت - مکش بزرگتر است که این مورد، از کم‌برآورد کردن ضریب شکل توسط معادله رطوبت - مکش حکایت دارد. متوسط مقدار $\frac{n}{\hat{n}}$ در این 8 خاک حدود 0/82 می‌باشد (حدود 22 درصد کم‌برآورد). علاوه بر این اختلاف، ضریب شکل به دست آمده از رابطه رطوبت - مکش دارای دامنه‌ی تغییرات محدودتر بوده و مقدار متوسط آن بین اعداد 1 تا 2 نوسان می‌کند. در صورتی که این بازه برای رابطه هدایت هیدرولیکی - مکش، دارای تفرق بیشتری است. تا این مرحله، نتایج این پژوهش، با نتایج مطالعات وارا کاوی و همکاران (2008) در خصوص ضعف *RETC* در برآورد نامناسب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در شرایط موجود نبودن داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی دارد. در این بخش، نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام در خصوص ارتباط متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ارائه شده و به تحلیل ارقام حاصل پرداخته می‌شود.

ضرایب مدل رگرسیونی

برای بررسی و تفسیر، ابتدا مدل رگرسیونی بدست آمده به صورت رابطه‌ی 8 و سپس در جدول شماره 3، جزئیات مربوط به آن ارائه می‌گردد:

(8)

$$\hat{n} = 3.227 - 3.803(\theta_s) + 0.117(OM)$$

که در آن، \hat{n} ضریب شکل معادله‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، θ_s مقدار رطوبت اشباع بر حسب اعشار و OM مقدار ماده آلی خاک بر حسب درصد می‌باشد.

هیدرولیکی - رطوبت برآورد شده با *RETC* در بیشتر نقاط، در زیر منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده قرار گرفته و نشان می‌دهد که به رغم آن که n رابطه‌ی رطوبت - مکش، حاصل بهترین برازش است، پیش‌بینی مطلوبی از هدایت هیدرولیکی غیر اشباع نداشته و باعث کم‌برآورد این خصوصیت شده است. لذا با اعمال ضریب اصلاحی β و افزایش مقدار n تا حدی معین، تطابق دو منحنی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بیشتر و خطای برآورد کمتر می‌شود. در شکل 2 - د نیز که مربوط به خاک رسی است، ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش دارای بیش‌برآورد است. به طور کلی و با فرض پذیرش رابطه‌ی $\hat{n} = \beta n$ در وضعیت بیش‌برآورد n مقدار حدودی β بین 0/33 تا 1 و در حالت کم‌برآورد کردن n توسط رابطه رطوبت - مکش، مقدار حدودی β بین 1 تا 3/04 متغیر خواهد بود. این دامنه، با توجه به بازه‌ی به دست آمده برای n که در مطالعات پژوهش‌گران محدوده‌ی 1/05 تا 3/19 اعلام شده ارائه شده است (وروت و همکاران، 2001؛ تولر و همکاران، 2003؛ سیمونک و همکاران، 2006؛ گری و همکاران، 2010). همچنین، بررسی ظاهری چهار گراف رسم شده در شکل 2 نشان می‌دهد که خاک‌های با بافت سبک‌تر، فارغ از وجود خطا در بیش‌برآورد یا کم‌برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، دارای تطابق ظاهری بیشتر و تقعر همسان‌تر با منحنی اندازه‌گیری شده می‌باشند. نتایج برآورد نامطلوب منحنی هدایت هیدرولیکی بر پایه‌ی n در این بخش، نتایج حاصل از پژوهش وارا کاوی و همکاران (2008) را در خصوص عملکرد ضعیف نرم‌افزار *RETC* در برخی موارد تأیید می‌نماید.

به منظور بررسی بیشتر ضریب شکل تعریف شده برای رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت (\hat{n}) و میزان تطابق آن با (n)، تعداد 8 خاک از کلاس‌های مختلف بافتی از بین خاک‌های برگزیده به صورت تصادفی

جدول 2- متوسط ضرایب شکل محاسبه شده از معادلات رطوبت - مکش (نرم‌افزار RETC) و هدایت هیدرولیکی - رطوبت با استفاده از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده برای 8 خاک منتخب

نسبت $\frac{n}{\bar{n}}$	ضریب شکل خروجی از رابطه هدایت هیدرولیکی - رطوبت (\bar{n})	ضریب شکل خروجی از نرم‌افزار RETC (n)	تعداد داده‌های هدایت هیدرولیکی - رطوبت	تعداد داده‌های رطوبت - مکش	شماره خاک	بافت خاک
0/630	3/136	1/977	25	25	4650	شنی
0/663	2/022	1/342	43	10	1380	لومی شنی
1/113	1/266	1/409	6	10	2552	لومی رسی شنی
0/953	1/354	1/291	18	11	3360	لومی سیلتی
0/891	1/673	1/490	6	20	2530	لومی
0/486	2/235	1/087	12	12	3031	لومی رسی
0/689	2/177	1/501	11	10	3120	رسی سیلتی
1/138	1/307	1/487	25	25	4681	رسی

جدول 3- ضرایب مدل رگرسیون پیشنهادی

سیگما	ضرایب استاندارد	انحراف معیار	ضریب معادله	متغیرهای مستقل
0/000		0/454	3/227	(ثابت معادله)
0/004	-0/844	1/044	-3/803	رطوبت اشباع
0/036	0/552	0/049	0/117	ماده آلی

بطور کلی، مقدار ماده آلی در بسیاری از توابع انتقالی برآورد کننده ضریب شکل n نقش داشته است (وستن و همکاران، 1999؛ کاستلینی و همکاران، 2019). با توجه به این که نرم‌افزار RETC در شرایط کمبود یا فقدان داده، از مدل ROSETTA بعنوان یک افزونه مبتنی بر روش شبکه‌های عصبی، برای پیش‌بینی پارامترهای مورد نیاز مدل VGM بهره می‌برد، می‌توان با بررسی بیشتر و تکیه بر همبستگی میان مقدار ماده آلی و مقدار ضریب شکل که در نتایج حاصل از این پژوهش و سایر مطالعات (که در بالا به آن اشاره شد) دیده می‌شود، نسبت به به‌روز رسانی و آموزش مجدد مدل اقدام نمود تا برآورد‌های مناسب‌تری از پارامترهای خاک و در نتیجه روابط مطلوب‌تری بین پارامترهای هیدرولیکی حاصل گردد.

در ادامه، در جدول شماره 4، خلاصه اطلاعات مدل‌سازی در قالب پارامترهای آماری بیان شده است.

ستون دوم و سوم (از راست)، ضریب هر یک از متغیرهای مستقل به همراه خطای استاندارد (انحراف معیار مربوط به آن) دیده می‌شود. همچنین، به منظور مشخص کردن درجه اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل و نقش آن‌ها در مدل رگرسیونی، ضرایب استاندارد ارائه می‌شوند. هرچه مقدار ضریب استاندارد بزرگ‌تر باشد، نقش موثرتری در پیش‌بینی متغیر وابسته \bar{n} خواهد داشت. بر اساس نتایج ستون ضرایب استاندارد، با توجه به این که مقدار این ضریب برای ماده آلی بزرگتر از مقدار آن برای رطوبت اشباع است، در برآورد ضریب \bar{n} نقش پررنگ‌تری دارد. مقدار سیگما نیز مشخص می‌کند که یک متغیر در یک رابطه چقدر نقش دارد. همچنین، بر پایه‌ی نتایج، با توجه به این که مقدارهای سیگمای به دست آمده برای رطوبت اشباع و مقدار ماده آلی کمتر از 0/05 است، نشان از نقش مؤثر ضرایب در برآورد متغیر وابسته دارد.

جدول 4- نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام و مشخص شدن متغیرهای مستقل برای برآورد متغیر وابسته \hat{n}

شماره مدل	ضریب همبستگی پیرسون	ضریب تعیین	انحراف معیار برآورد	آماره Durbin-Watson
1	0/570	0/325	0/27534	
2	0/745	0/555	0/23359	2/05

1- متغیرهای پیشگو: (مقدار ثابت)، رطوبت اشباع

2- متغیرهای پیش گو: (مقدار ثابت)، رطوبت اشباع و مقدار ماده آلی

ناشناخته مانده، شاید بتوان آن را در عواملی دیگر همچون تغییرات ضریب l یا حتی مقدار خطای اندازه‌گیری Ks جستجو کرد.

برای اعتمادپذیری بیشتر مدل، نیاز است که آماره‌های دیگری نیز بررسی شوند. ستون آخر جدول 4 نیز مقدار آماره آزمون دوربین - واتسون که مربوط به خودهمبستگی باقی‌مانده‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد. مقدار این آماره بین صفر و 4 بوده و هرچه به 2 نزدیک‌تر باشد، نشان از مستقل بودن باقی‌مانده‌ها دارد (واتسون و همکاران، 1951). مقدار 2/05 حاصل از این آزمون نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌ها دارای خودهمبستگی نیستند. بنابراین، نتایج تحلیل‌ها قابل اعتمادتر خواهند بود. جهت بررسی بیشتر مدل، نتایج تحلیل واریانس مدل در جدول شماره 5 ارائه شده است.

بر پایه نتایج جدول شماره 4، دو مدل خروجی پیشنهاد داده شده است. در مقایسه دو مدل، هر مدلی که دارای ضریب همبستگی و ضریب تعیین بیشتر (نزدیک‌تر به یک) و مقدار انحراف معیار برآورد کمتری (نزدیک‌تر به صفر) باشد، ارجح است. به بیان دیگر، مدل رگرسیونی توانسته درصد بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را تحت پوشش قرار داده و بیان کند. بنابراین مدل 2 با داشتن ضریب همبستگی ($r=0.745$) و ضریب تعیین ($R^2=0.555$) و انتخاب متغیرهای مستقل رطوبت اشباع و درصد مواد آلی، به عنوان متغیرهای پیش‌گو، پیش‌بینی کننده خوبی برای مقدار متغیر وابسته یا همان \hat{n} بوده است. این بدان معناست که دو پارامتر θ_s و OM قادر به پیش‌بینی 55/5 درصد از تغییرات \hat{n} بوده‌اند. از آنجا که در حدود 44/5 درصد عوامل موثر در برآورد این ضریب

جدول 5- نتایج آزمون تجزیه واریانس

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره‌ی آزمون F^*	سیگما
رگرسیون	0/749	2	0/374	11/68	0/0005
خطا	0/600	19	0/032		
کل	1/349	21			

بزرگتر باشد، سیگما کوچکتر شده و مدل رگرسیونی مناسب‌تر خواهد بود. نتایج مربوط به F^* و سیگما، عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد، $[F(2,19)=11.68, p=0.0005]$

این که آیا یک مدل می‌تواند به نحوی مناسب، مقدار متغیر مستقل را پیش‌بینی کند یا خیر، با تجزیه و تحلیل جدول واریانس مشخص می‌شود. آماره‌ی آزمون F^* ، نشانگر سهمی است که مدل رگرسیونی نسبت به باقی‌مانده‌ها در بیان پراکندگی کل دارد. هر چه این مقدار

صحت‌سنجی مدل

رگرسیون در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، در شش خاک بهتر و در دو خاک کمی ضعیف‌تر از *RETC* بوده است. همچنین، مقدار خطا در مواردی که نرم‌افزار *RETC* عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیونی داشته اندک و قابل چشم‌پوشی است. هرچند، به منظور اثبات برتری یک روش بر دیگری، بایستی شاخص‌های کلی مطلوبیت عملکرد همچون *RMSE* و *NSE* برای هر یک از روش‌ها محاسبه و مقایسه گردد.

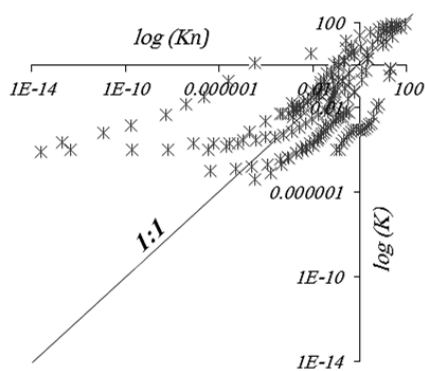
در جدول 6، مقدارهای خروجی ضریب شکل دو مدل به همراه خطای هدایت هیدرولیکی برآورد شده در رطوبت‌های مختلف بر اساس دو ضریب شکل n (خروجی نرم‌افزار *RETC*) و \hat{n} (خروجی مدل رگرسیونی) با مقدارهای اندازه‌گیری شده در قالب پارامتر آماری *RMSE* برای 8 خاک بانک *UNSODA* ارائه شده است. این مقدارها نشان می‌دهند که عملکرد مدل

جدول 6- مقایسه خطای هدایت هیدرولیکی برآورد شده توسط دو نرم‌افزار *RETC* و مدل رگرسیونی با مقدارهای اندازه‌گیری شده برای خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی

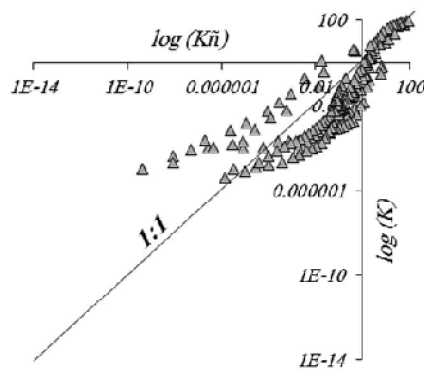
<i>RMSE (log(K))</i> (cm/day)		مقدار محاسباتی ضریب شکل بر اساس			شماره خاک	ردیف
مقایسه مقادیر واقعی با مدل رگرسیونی	مقایسه مقادیر واقعی با نرم‌افزار <i>RETC</i>	مدل رگرسیونی (\hat{n})	نرم‌افزار <i>RETC</i> (n)	بافت		
2/1780	6/4033	2/039	1/415	شنی	4651	1
0/7844	0/7910	1/857	1/342	لوم شنی	1380	2
1/4815	2/5308	1/815	1/321	لوم	4101	3
0/9879	1/4591	1/422	3/350	لوم	4610	4
0/8804	0/2561	1/395	1/925	لوم رسی	2682	5
0/9284	0/9766	1/567	1/550	سیلت	4670	6
1/6959	2/7654	1/226	1/464	رس	4121	7
1/2903	1/0695	1/654	1/487	رس	4681	8
1/2784	2/0190	متوسط:				

مطلوب‌تری را در مقایسه با *RETC* ارائه کرده است. در شکل 3 - ب نیز، عملکرد نسبتاً ضعیف *RETC* در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های زیاد (رطوبت‌های کم)، حداقل در سه خاک از هشت خاک منتخب بخش صحت‌سنجی، مشهود است.

جهت ارزیابی بهتر نتایج بخش صحت‌سنجی، لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده هدایت هیدرولیکی برای 8 خاک منتخب، در مقابل مقدار متناظر به دست آمده از دو ضریب شکل n و \hat{n} در شکل 3 رسم و با خط یک به یک مقایسه گردید. فاصله کمتر مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از ضریب شکل مدل رگرسیونی با خط یک به یک، بیانگر آن است که این مدل، نتایج



3 - ب

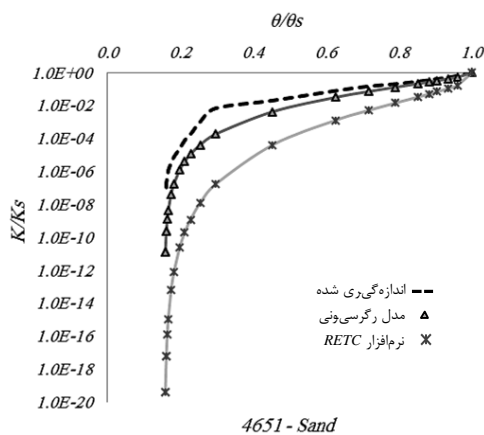
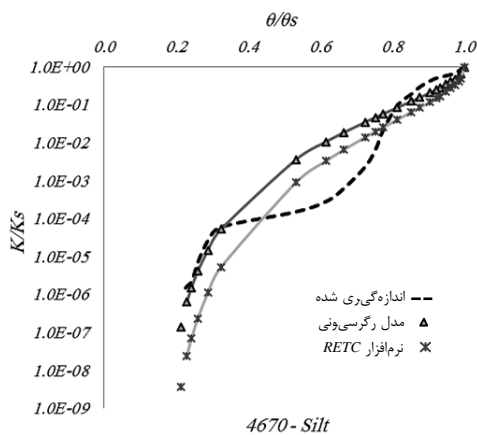


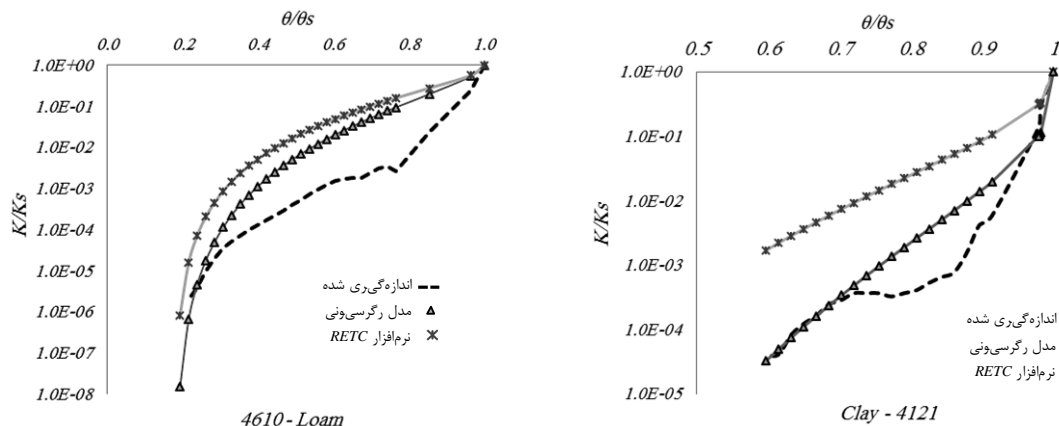
3 - الف

شکل 3- مقایسه لگاریتم مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی برای خاک های منتخب بخش صحت سنجی؛ شکل 3 - الف: مقایسه لگاریتم مقادیر هدایت هیدرولیکی مدل رگرسیونی $\log(K\hat{n})$ و اندازه گیری شده $\log(K)$ ؛ شکل 3 - ب: مقایسه لگاریتم مقادیر هدایت هیدرولیکی $\log(Kn)$ محاسبه شده با *RETc* و اندازه گیری شده $\log(K)$

در شکل 4، منحنی های هدایت هیدرولیکی - رطوبت به دست آمده از دو ضریب شکل حاصل از نرم افزار *RETc* و مدل رگرسیونی برای 4 خاک بخش صحت سنجی با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه شده است. نمودارها نشان می دهند که مدل ایجاد شده، در پیش بینی تغییرات هدایت هیدرولیکی، عملکرد بهتری را در مقایسه با نرم افزار *RETc* داشته است. همچنین، سنگین تر شدن بافت خاک و افزایش نیروی نگه داشت آب، منجر به کند شدن تغییرات رطوبت در مقابل هدایت هیدرولیکی شده و شکل کلی منحنی اندازه گیری شده از حالت تحدب به تقعر گرایش پیدا کرده و تطابق منحنی را با مدل *VGM* کمتر می کند. این نتیجه، با نتایج حاصل از مطالعه ی ژانگ و همکاران (2016) همخوانی دارد.

در شکل 4، منحنی های هدایت هیدرولیکی - رطوبت به دست آمده از دو ضریب شکل حاصل از نرم افزار *RETc* و مدل رگرسیونی برای 4 خاک بخش صحت سنجی با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه شده است. نمودارها نشان می دهند که مدل ایجاد شده، در پیش بینی تغییرات هدایت هیدرولیکی، عملکرد بهتری را در مقایسه با نرم افزار *RETc* داشته است. همچنین، سنگین تر شدن بافت خاک و افزایش نیروی نگه داشت آب، منجر به کند شدن تغییرات رطوبت در مقابل هدایت هیدرولیکی شده و شکل کلی منحنی اندازه گیری شده از حالت تحدب به تقعر گرایش پیدا کرده و تطابق منحنی را با مدل *VGM* کمتر می کند. این نتیجه، با نتایج حاصل از مطالعه ی ژانگ و همکاران (2016) همخوانی دارد.





شکل 4- مقایسه منحنی هدایت هیدرولیکی نسبی - رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده با دو منحنی برآورد شده برای چهار خاک بخش صحت‌سنجی

باشد، عملکرد مدل ضعیف تلقی می‌شود. بر این اساس، مقدار ضریب NSE مدل ایجاد شده حاصل از این پژوهش، در محدوده‌ی قابل قبول قرار می‌گیرد. مقایسه مقدار $RMSE_M$ مربوط به دو روش نیز نشان می‌دهد که عملکرد مدل ایجاد شده، در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی در مکش‌های مختلف مطلوب‌تر بوده و نسبت به $RETC$ دارای خطای کمتری بوده است. شاخص‌های آماری مطلوبیت دو روش در جدول شماره 8 ارائه شده است.

جهت ارزیابی کلی مدل ایجاد شده و مقایسه آن با نرم‌افزار $RETC$ ، مقادیر K به ترتیب بر پایه‌ی \hat{n} و n برای 8 خاک بخش صحت‌سنجی محاسبه و مقدار جذر میانگین مربعات خطای مدل ($RMSE_M$) و ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NSE) برای هر دو روش محاسبه گردید. بر اساس معیار ارائه شده توسط موتویلو و همکاران (1999)، چنانچه مقدار ضریب نش‌ساتکلیف برای یک مدل هیدرولوژیکی بین 0/36 و 0/75 باشد، عملکرد مدل رضایت‌بخش و چنانچه مقدار این شاخص کمتر از 0/36

جدول 8- مقایسه عملکرد کلی مدل ایجاد شده و نرم‌افزار $RETC$ در برآورد هدایت هیدرولیکی بر اساس شاخص‌های $RMSE_M$ و NSE

جذر میانگین مربعات خطا	ضریب نش‌ساتکلیف	
1/340	0/521	مدل ایجاد شده
2/706	-0/955	نرم‌افزار $RETC$

نتیجه‌گیری

\hat{n} در 75 درصد از نمونه‌های انتخاب شده دارای کم‌برآورد می‌باشد. در ادامه، یک تابع انتقالی برای برآورد پارامتر ضریب شکل رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت مدل VGM با استفاده از ویژگی‌های خاک به روش رگرسیون گام به گام ایجاد و صحت‌سنجی گردید و اعتبار آن در مقایسه با نرم‌افزار $RETC$ مورد بررسی قرار

در این مطالعه، مقادیر ضرایب شکل حاصل از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده بر روابط $\theta-h$ و $\theta-K$ مدل VGM (n و \hat{n}) انجام و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از ضریب شکل n حاصل از رابطه‌ی $\theta-h$ مدل VGM جهت برآورد مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های مختلف در مقایسه با

مقدار ماده آلی زیاد با احتیاط صورت گیرد. تاریخچه و وضعیت فعلی توابع انتقالی، نیاز به توسعه و مطالعات منسجم در این خصوص را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف خاک به صورت جفت، ارزش داده‌های اندازه‌گیری شده را افزایش داده و می‌تواند در توسعه توابع انتقالی نقش بیشتری داشته و به درک عملکرد رفتار خاک کمک نماید.

گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ضریب شکل تابع رگرسیونی حاصل از مطالعه، در مقایسه با وضعیتی که از n بعنوان ضریب شکل معادله $K-\theta$ استفاده شود، برآوردهای مطلوب‌تری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل VGM ارائه می‌دهد. همچنین، در در مواردی که تابع رگرسیونی مغلوب $RETC$ شده، اختلاف خطا به نسبت کم بوده است. بایستی توجه داشت که عملکرد تابع رگرسیونی به دست آمده بایستی برای خاک‌های دارای

فهرست منابع:

1. حق وردی، امیر، قهرمان، بیژن، جلیبی، محمد، خشنود یزدی، علی اصغر، عربی، زهرا. 1389. مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی برخی خاک‌های ایران با استفاده از توابع انتقالی شبه پارامتریک شبکه عصبی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. شماره 1. صفحات 69-82.
2. Baker, L., and Ellison, D. 2008. Optimization of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*. 144: 212-224.
3. Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. In B. A. Stewart (Ed.), *Advances in soil science* (Vol. 9, pp. 177-213).
4. Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrological Paper no. 3*. Colorado State University, Fort Collins.
5. Carney, J. G. and Cuningham, P. 1999. The NeuralBAG algorithm: Optimizing generalization performance in bagged neural networks. 7th European Symposium on Artificial Neural Network. Bruges (Belgium).
6. Castellini, M., and Iovino, M. 2019. Pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of Sicilian soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*. V.65:1401-1416.
7. Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., and Ginn, T.R. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* 20:682-690.
8. Dettmann U., Bechtold M., Frahm E., and Tiemeyer B., 2014. On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten-Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *J. Hydrol.*, 515: 103-115.
9. Durbin, J. and Watson, G. S. 1951. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression, II. *Biometrika*. 38 (1-2): 159-179.
10. Haghverdi, A.; Cornelis, W. M., Ghahraman, B. 2012. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *J. Hydrol.* 442-443, 46-54.
11. Hill, R.L. 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 161-166.
12. Jana R. B., Mohanty, B. P. 2011. Enhancing PTFs with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation. *J Hydrol.* 399: 201-211.
13. Kong, J., Shen, C., Luo, Z., Hua, G., & Zhao, H. (2016). Improvement of the hillslope-storage Boussinesq model by considering lateral flow in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.* 52(4): 2965-2984.
14. Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32(121): 2697-2703.

15. Luo, Z., Kong, J., Shen, C., Lu, C., Hua, G., Zhao, Z., Zhao, H., Li, L. (2019). Evaluation and application of the modified van Genuchten function for unsaturated porous media, . *J. Hydrol.* 571 (2): 279–287.
16. McCuen, R.H., Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L. 1981. Statistical analysis of the Brooks-Corey and the Green-Ampt parameters across soil textures. *Water Resour. Res.* 17:1005-1013.
17. Minasny, B., McBratney, A.B., and Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma.* 93: 225-253.
18. Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K. dan Rodhe, A. 1999. Validation of a Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations. *Elsevier Agricultural and Forest Meteorology.* 98: 257-277.
19. Mualem, Y. 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:513–522.
20. Nemes, A., Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A. 2006. Use of the Nonparametric Nearest Neighbor Approach to Estimate Soil Hydraulic Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:327–336.
21. Patil, N. G., Rajput, G. S., Nema, R. K., Singh, R. B. 2010. Predicting hydraulic properties of seasonally impounded soils. *J Agr Sci Cambridge.* 148: 159–170.
22. Patil, N. G., Chaturvedi, A. 2012. Pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural networks approach to estimate available water capacity of shrink-swell soils. *Indian J AgrSci.* 82: 35–38.
23. Puckett, W. E., Dane, J.H. and Hajek, B. F. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:831–836.
24. Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media, *Physics*, I, 318-333.
25. Ritter, A. and Muñoz-Carpena, R. 2013. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness of fit assessments. *J. Hydrol.* 480 (1): 33–45.
26. Schaap, M. G., Leij, F. J. 2000. Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:843–851.
27. 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. *J. Hydrol.* 251(3-4): 163-176.
28. Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:847–855.
29. Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van genuchten, M.Th. 1999. A bootstrap neural network approach to predict soil hydraulic parameters, P 1237-1250.
30. Schaap, M.G., 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
31. Simunek, J., Van Genuchten, M. Th., and Sejna, M. 2006. The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably – Saturated Media. *Technical Manual.*
32. Singh, A., Haghverdi, A., Öztürk, H. S., Durner, W. 2020. Developing Pseudo Continuous Pedotransfer Functions for International Soils Measured with the Evaporation Method and the HYPROP System: I. The Soil Water Retention Curve. *Water Journal.* 12:1-17.
33. Tamari, S., Bruckler, L., Halbertsma, J., and Chadoeuf, J. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 642-651.

34. Tuller, M. and Dani, Or. 2003. Hydraulic functions for swelling soils: pore scale considerations. *J Hydrol.* 272: 50–71.
35. Twarakavi, N. K. C., Saito, H., Simunek, J., van Genuchten M.Th. 2008. A New Approach to Estimate Soil Hydraulic Parameters Using Only Soil Water Retention Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 471–479.
36. Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
37. Van Genuchten, M. Th., Lesch, S. M. and Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Version 1.0. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
38. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389–403.
39. Vrugt, J.A., Weerts, A.H. and Bouten, W. 2001. Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 19-27.
40. Wösten, J.H.M., and van Genuchten, M. Th. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1762–1770.
41. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169–185.
42. Wösten, J.H.M., Pachepsky Y. A. and Rawls W. J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J Hydrol.* 251: 123–150.
43. Yates, S.R., van Genuchten, M. Th., Warrick, A.W. and Leij, F.J. 1992. Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:347–354.
44. Zhang, Z., Wang, W., Yeh, T. J., Chen, L., Wang, Z., Duan, L., A. K., Gong, C., 2016 . Finite analytic method based on mixed-form Richards' equation for simulating water flow in vadose zone. *J Hydrol.* 537: 146 – 156.

Estimation of Shape Factor of Soil Hydraulic Conductivity Function of van Genuchten – Mualem Model Using Easily-Available Soil Properties

M. Shiasi Arani, B. Ghahraman¹, H. Emami, and K. Davari

PhD Candidate of Irrigation and Drainage., Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: m.shiasi@mail.um.ac.ir

Professor, Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: bijangh@um.ac.ir

Professor, Dept. of Soil Sciences., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: hemami@um.ac.ir

Professor, Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: k.davary@um.ac.ir

Received: August, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Proper soil hydraulic functions that accurately predict soil water characteristic curve and hydraulic conductivity are essential for studies of unsaturated flow in soils. In this study, 8 soils from different texture classes of UNSODA soil bank were selected and the optimal validity of shape factor (n) of the RETC software (using retention curve function of van Genuchten-Mualem (VGM) model) was investigated for predicting the value of unsaturated hydraulic conductivity at different moisture contents. Since the predicted results of this model were poor, we attempted to investigate a separate shape factor such as \hat{n} for the hydraulic conductivity-moisture ($K-\theta$) function of VGM Model. To this end, 24 soil samples from different texture classes of UNSODA were selected and their measured parameters were analyzed by regression analysis to find a suitable pedotransfer function for estimating \hat{n} . The developed function confirmed the relationship of \hat{n} with both saturated moisture (θ_s) and organic matter contents with a correlation coefficient of $r = 0.745$ at significant level of $P = 0.0005$. Also, to validate the developed pedotransfer function, the hydraulic conductivity values corresponding to the measured moistures for the 8 selected soils in the validation section were calculated based on the two shape factors obtained from the pedotransfer function (\hat{n}) and the RETC (n) and the results were compared with the measured values. The statistical indices of root mean square error of model ($RMSE_M$) and Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) showed that the shape factor of the developed pedotransfer function compared to the RETC, had a better performance in predicting unsaturated hydraulic conductivity values.

Keywords: Pedotransfer functions, Unsaturated flow, Shape factor, Soil water characteristic curve

¹ Corresponding author: Dept. of Water Eng, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad.