

ارزیابی چند مدل منحنی رطوبتی خاک در اراضی کشاورزی دشت قروه-دهگلان، استان کردستان

سیما اصغرزاددانش^۱، بهروز مهدی نژادیانی^{۲*}، مسعود داوری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

۱-دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲-استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳-استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.mehdinejad@uok.ac.ir

چکیده

منحنی رطوبتی خاک رابطه‌ی کمی بین رطوبت و مکش ماتریک خاک را بیان می‌کند. اندازه‌گیری مستقیم این منحنی دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است. از این رو، چندین مدل تجربی، ریاضی و تحلیلی مختلف برای توصیف آن ارائه شده است. در این پژوهش ۱۱ مدل منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های رطوبت حجمی و مکش ماتریک در ۲۷ نمونه خاک جمع آوری شده از اراضی کشاورزی دشت قروه-دهگلان و اسنجدی شدند. عمل واسنجدی مدل‌ها با استفاده از جعبه‌ابزار Solver در نرم‌افزار Excel انجام یافت و از داده‌های شش نمونه‌ی دیگر خاک برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شد. آماره‌های R^2 ، RMSE، NRMSE و MBE برای ارزیابی درستی تخمین مدل‌های مطالعه شده استفاده گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، برای بافت‌های لوم و رس دو مدل لیباردی و همکاران و سیمونز و همکاران، برای بافت لوم رسی سیلتی مدل بروکس و کوری، برای بافت لوم رسی مدل‌های بروکس و کوری و کمپل، برای بافت رس سیلتی مدل‌های ون گنوختن $m=1-2/n$ و بروکس و کوری و برای بافت لوم شنی مدل توانی جهت پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک در خاک‌های منطقه پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، رطوبت حجمی، مدل ریاضی، مکش ماتریک، RMSE

Evaluating Some Soil Water Characteristic Curve Models in Agricultural Lands of Qorveh-Dehgolan, Kurdistan Province

S Asgarzad Danesh¹, B Mehdinejadani^{*2}, M Davari³

Received: December 19, 2017 Accepted: December 16, 2020

¹M.Sc. Graduated student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

²Assist. Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³ Assist. Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

*Corresponding author, Email: b.mehdinejad@uok.ac.ir

Abstract

Soil water characteristic curve (SWCC) represents the quantitative relationship between soil water content and matric suction. Direct measurement of this curve is laborious, time consuming and expensive. Hence, several experimental, mathematical and analytical models have been presented to describe the SWCC. In this research, 11 SWCC models were calibrated using volumetric water content and matric suction data of 27 soil samples of Qorveh-Dehgolan plain agricultural lands. Solver Toolbox in Excel used to calibrate the models and six other soil samples data used for result validation. The R^2 , RMSE, NRMSE and MBE statistics were used to assess the prediction accuracy of the models. According to the obtained results, for clay and loam textures, Libardi et al and Simmons et al models, for silty clay loam texture, Brooks and Corey model, for clay loam texture, Brooks and Corey and Campbell models, for silty clay texture, Van Genuchten $m=1-2/n$ and Brooks and Corey models and for sandy loam texture, power model was proposed to predict soil water characteristic curve in the soils of the studied lands.

Key words: Mathematic model, Matric suction, Soil texture, RMSE, Volumetric water content.

مقدمه

و رطوبت اشباع خاک که تخلخل کل خاک را مشخص می‌کند از این منحنی قابل استخراج می‌باشد. لئونگ و رهاردجو (۱۹۹۷) منحنی‌های حاصل از مدل‌های ون-گنوختن و فردلاندر و ژیانگ را با مقادیر مختلف پارامترهای هیدرولیکی مقایسه کردند. ایشان نشان دادند با ثابت فرض کردن پارامترهای m و α (عکس مکش ورود هوا به خاک) و تغییر پارامتر n (که شیب منحنی را در نقطه‌ی عطف تعریف می‌کند) منحنی‌ها در نقطه‌ی عطف با شیب‌های مختلف همدیگر را قطع می‌کنند، به گونه‌ای که با افزایش n مقدار شیب در این نقطه کاهش می‌یابد (با فرض اینکه محور افقی مربوط به رطوبت و محور عمودی مربوط به مقادیر مکش باشد).

منحنی رطوبتی خاک از ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک است. این منحنی رابطه‌ی بین مکش ماتریک و رطوبت حجمی خاک را نشان می‌دهد. جهت شبیه‌سازی منحنی رطوبتی خاک مدل‌های مختلفی ارائه شده است. تأثیر عواملی همچون توزیع اندازه‌ی خلل و فرج خاک که مرتبط با بافت و ساختمان خاک است به صورت کمی در این مدل‌ها گنجانده شده‌اند. مدل‌های منحنی رطوبتی خاک در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک غیر اشباع به کار گرفته می‌شوند (کائو و یوآ ۲۰۱۴). همچنین مقدار رطوبت در نقاط پتانسیلی مهمی همچون ظرفیت مزرعه، نقطه‌ی پژمردگی دائم (هر دو در تعیین میزان آب قابل دسترس گیاه حائز اهمیت هستند)

و فارل و لارسون را برای خاک‌های دشت لردگان با بافت‌های لوم شنی، لوم سیلتی، سیلت، لوم، لوم رس سیلتی و رس سیلتی برآورد و عملکرد مدل‌ها را بر اساس آماره‌های R^2 و RMSE مقایسه کردند. در این تحقیق، مدل ون‌گنوختن بهترین مدل و مدل بروکس و کوری ضعیف‌ترین مدل گزارش شده است.

دشت قروه-دهگلان از مناطق مهم کشاورزی آبی و دیم در استان کردستان می‌باشد. بنابراین، تعیین منحنی رطوبتی خاک و مدلی که این منحنی را در این دشت به خوبی شبیه‌سازی کند بسیار حائز اهمیت است. زیرا این منحنی در تعیین زمان آبیاری و تعیین مقدار رطوبت قابل استفاده گیاهان کاربرد دارد (خرسند و همکاران ۲۰۱۹). براساس پژوهش‌های انجام شده تاکنون مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی خاک در این دشت صورت نگرفته است. از سویی دیگر، راجع به ارزیابی عملکرد مدل فردلاند و ژیانگ در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی خاک نیز پژوهش‌های بسیار اندکی در ایران صورت گرفته است. بنابراین، هدف از این پژوهش برآورد ضرایب مدل فردلاند و ژیانگ و ۱۰ مدل مختلف دیگر، و همچنین مقایسه‌ی دقت این مدل‌ها در برآورد منحنی رطوبتی خاک در اراضی کشاورزی دشت قروه-دهگلان بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق نمونه‌برداری از دشت قروه-دهگلان و به صورت کاملاً تصادفی انجام شد. نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که بیان‌گر پراکنش بافتی خاک-های غالب در منطقه بود. نمونه‌های دست‌نخورده با کوبیدن استوانه فلزی در عمق معین خاک تهیه شدند. این نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری و همچنین تعیین مقادیر رطوبت حجمی در نُه مکش صفر، ۱/۰، ۳/۰، ۵/۰، ۱۰، ۱۵ بار در دستگاه صفحات فشاری استفاده شدند. برای تعیین توزیع اندازه ذرات خاک، اندازه‌گیری جرم مخصوص حقیقی و ماده‌ی آلی خاک از نمونه‌های دست‌خورده استفاده

پارامتر n در این دو مدل به توزیع اندازه‌ی منافذ خاک ارتباط دارد و در توزیع‌های یکسان اندازه‌ی منافذ رقم بالاتری دارد. در این دو مدل، با ثابت فرض کردن n و m و کاهش α منحنی‌ها به سمت مکش‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود به طوری که شیب یکسانی دارند. با تغییر m ، منحنی‌ها بدون نقطه‌ی تقاطع با فاصله‌های کم و با شیب‌های نسبتاً یکسان (با تفاوت کم) رسم می‌شوند به طوری که با افزایش m منحنی به سمت مکش‌های پایین‌تر حرکت می‌کند. خطای تخمین مدل فردلاند و ژیانگ در مکش‌های بالا نسبت به مدل ون‌گنوختن بیشتر است. در مدل بروکس و کوری ضریب توزیع اندازه‌ی منافذ خاک شیب منحنی رطوبتی را تعریف می‌کند. هر چه دامنه‌ی توزیع اندازه‌ی منافذ خاک وسیع‌تر باشد (خاک‌های ریز بافت و خاک‌های دارای ساختمان مناسب) و نیز در رطوبت‌های نزدیک اشباع دقت تخمین مدل کمتر است. در خاک‌های درشت بافت و نمونه‌های دست‌خورده مدل دقیق‌تر بوده و در رطوبت‌های نزدیک نقطه‌ی پژمردگی نتایج بهتری به دست می‌دهد. مدل کمپل (۱۹۷۴) که یک مدل فیزیکی-تجربی است در تعیین منحنی رطوبتی خاک به درصد ذرات خاک و جرم مخصوص ظاهری توجه می‌کند. دقت تخمین این مدل در مکش‌های نزدیک به نقطه‌ی پژمردگی کمتر است. رضایی و همکاران (۲۰۰۱) دقت مدل کمپل را در تخمین منحنی رطوبتی خاک‌های دشت سراب ایران بررسی و نتایج حاصل از مدل کمپل را قابل قبول ارزیابی کردند. هر چند میزان همبستگی در مکش‌های صفر تا یک بار بیشتر از مکش‌های یک تا ۱۵ بار بود. نقوی و همکاران (۲۰۰۳) جهت شبیه‌سازی منحنی رطوبتی خاک دو مدل نمایی و لگاریتمی ($\theta = ah^b$ و $\theta = b + aLnh$) را ارائه کردند. نتایج نشان داد مدل نمایی نسبت به مدل لگاریتمی دقت بیشتری دارد. نبی‌زاده و بیگی هرچگانی (۲۰۱۱) با به‌کارگیری نرم‌افزار SWRC3 ضرایب مدل-های ون‌گنوختن، لیباردی و همکاران، بروس و لاکسمور، کمپل، بروکس و کوری، سیمونز و همکاران

مدل‌ها حاصل شد. در فرآیند بهینه‌سازی برای برخی ضرایب مدل‌ها مقادیر برآوردی سایر پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲) و برآورد مقادیر بهینه در مورد سایر ضرایب انجام شد تا مقادیر بدست آمده خارج از بازه‌ی برآورد شده در پژوهش‌های پیشین نباشد. از ۲۷ نمونه خاک در این مرحله استفاده شد (واسنجی). شش نمونه‌ی باقیمانده برای اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی دقت تخمین مدل‌ها، آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (تاران و همکاران ۲۰۱۳)، درصد خطا (NRMSE) شاخالی و همکاران ۲۰۱۶) و میانگین خطای جهت‌گیری (MBE) (بنی‌مهد و همکاران ۲۰۱۴) محاسبه گردید.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\theta_{v.meas}} \times 100 \quad [۳]$$

$$MBE = \frac{\sum (\theta_{v.meas} - \theta_{v.cal})}{n} \quad [۴]$$

شده، y تعداد پارامترهای ورودی مدل و RSS مجموع مجزورات اختلاف مقادیر مشاهداتی و تخمینی می‌باشد.

جدول ۱- مدل‌های منحنی رطوبتی خاک مطالعه شده در این پژوهش.

منبع	نام مدل	شکل ریاضی مدل
ون‌گنوختن (۱۹۸۰)	ون‌گنوختن	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}$
لئونگ و رهاردجو (۱۹۹۷)	فردلاند و ژیانگ	$\theta = w(\psi) \times \frac{\theta_s}{\left(\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \right)^m}$ $w(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)}$
بروکس و کوری (۱۹۶۴)	بروکس و کوری	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (\alpha \psi)^{-\lambda}$ $\psi \geq \frac{1}{\alpha} \quad \theta = \theta_s \quad 0 \leq \psi \leq \frac{1}{\alpha}$
کمپل (۱۹۷۴)	کمپل	$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}$ $\psi \geq \psi_e \quad \theta = \theta_s \quad \psi < \psi_e$
دریسن (۱۹۹۲)	دریسن	$\theta = \theta_s \psi^{-\gamma \ln \psi}$
فارل و لارسون (۱۹۷۲)	فارل و لارسون	$\psi = \psi_c e^{\alpha \left(\frac{1 - \theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)}$ $\psi \geq \psi_c \quad \theta = \theta_s \quad \psi < \psi_c$
لیباردی و همکاران (۱۹۷۹)	لیباردی و همکاران	$\psi = \alpha (e^{\beta(\theta - \theta_s)} - 1)$ $\beta < 0$

گردید. توزیع اندازه ذرات خاک بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر با استفاده از سری الک‌ها و ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر با روش هیدرومتری تعیین گردید. با تعیین درصد‌های مربوط به شن و سیلت و رس، از روی نمودار توزیع اندازه‌ی ذرات و استفاده از نرم‌افزار تعیین کلاس بافت خاک، کلاس بافتی نمونه‌های مورد بررسی مشخص شد (رویج ۲۰۰۲). ۱۱ مدل منحنی رطوبتی خاک مذکور در جدول ۱ بر جفت داده‌های رطوبت حجمی و مکش ماتریک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در محیط نرم‌افزار Excel در جعبه ابزار Solver برازش داده شدند این عمل در یک فرآیند بهینه‌سازی و کمینه کردن مقدار اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی رطوبت انجام و ضرایب هر کدام از

$$R^2 = \frac{\left[\sum (\theta_{v.cal} - \overline{\theta_{v.cal}}) (\theta_{v.meas} - \overline{\theta_{v.meas}}) \right]^2}{\sum (\theta_{v.cal} - \overline{\theta_{v.cal}})^2 \sum (\theta_{v.meas} - \overline{\theta_{v.meas}})^2} \quad [۱]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\theta_{v.cal} - \theta_{v.meas})^2}{n}} \quad [۲]$$

که در آن‌ها $\theta_{v.meas}$ و $\theta_{v.cal}$ رطوبت‌های حجمی تخمینی و مشاهداتی ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، n تعداد داده‌های اندازه‌گیری

$\psi = \alpha(e^{\beta(\theta-\phi)} - 1)$	$\beta < 0$	سیمونز و همکاران	سیمونز و همکاران (۱۹۷۹)
$\psi = \alpha e^{-\beta\theta}$	$0 < \psi < \alpha$ $\beta > 0$	نمایی	به نقل از بروس و لاکسمور (۱۹۸۶)
$\psi = \alpha\theta^{-\beta}$	$\psi > 0$	توانی	به نقل از بروس و لاکسمور (۱۹۸۶)
$\theta = \theta_e + \frac{\theta - \theta_e}{15} \frac{e}{\ln(\psi - \psi_e + 1)}$	$\psi \geq \psi_e$ $\theta = \theta_e$ $\psi < \psi_e$	روگوسکی	روگوسکی (۱۹۷۱)

در تمامی مدل‌ها، θ رطوبت حجمی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و ψ مکش متناظر (cm)، θ_r رطوبت حجمی باقیمانده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و ψ_r مکش متناظر (cm)، θ_s رطوبت حجمی اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و ψ_e مکش ورود هوا به خاک (cm) می‌باشد. در مدل‌های ون‌گنوختن، فردلاندر و ژیانگ و بروکس و کوری m و n پارامترهای شکل (بدون بُعد)، α عکس مکش ورود هوا به خاک (cm^{-1})، $w(\psi)$ فاکتور اصلاح، α مکش ورود هوا به خاک (cm)، ψ_r مکش در نقطه‌ی پژمردگی دایم (cm) و λ شاخص توزیع اندازه‌ی خلل و فرج خاک (بدون بُعد) می‌باشد. در مدل کمپل b یک ثابت است که به صورت تجربی تعیین می‌شود. ψ_e در مدل فارل و لارسون شاخص مکش ورود هوا به خاک (cm) است. γ در مدل درینسن، α و β در مدل‌های فارل و لارسون، لیباردی و همکاران، سیمونز و همکاران، مدل‌های توانی و نمایی ضرایب تجربی هستند. در مدل روگوسکی θ_e رطوبت در نقطه‌ی ورود هوا به خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و θ_{15} رطوبت حجمی در مکش ۱۵ بار (ψ_{15}) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) می‌باشد ϕ در فرمول سیمونز و همکاران تخلخل کل ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر میانگین پارامترهای θ_r ، θ_s ، و α استخراج شده از پژوهش‌های کِلپ و همکاران (۱۹۷۸)، رالز و همکاران (۱۹۸۲)، کارسل و پاریش

(۱۹۸۸)، رسی و نیمو (۱۹۹۴) و کراوچنکو و ژیانگ (۱۹۹۸) جهت تخمین منحنی رطوبتی خاک.

α	θ_s	θ_r	بافت	α	θ_s	θ_r	بافت
cm^{-1}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$			cm^{-1}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		
۰/۰۲۱	۰/۴۴۴	۰/۰۶۵	لوم رسی سیلتی	۰/۰۱۹	۰/۴۵۹	۰/۰۷۹	رس
۰/۰۲۰	۰/۴۷۲	۰/۰۵۳	لوم	۰/۰۱۷	۰/۴۵۷	۰/۰۶۷	رس سیلتی
۰/۰۶۶	۰/۳۹۵	۰/۰۵۳	لوم شنی	۰/۰۲۷	۰/۴۵۲	۰/۰۳۸	لوم رسی

نتایج و بحث

کلاس‌های بافتی و برخی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های خاک مطالعه شده

نمونه خاک‌های مطالعه شده در این پژوهش به شش کلاس بافتی خاک و به طور عمده به کلاس‌های بافتی سنگین تعلق داشتند. تعداد اندکی نیز در کلاس بافتی درشت قرار گرفتند (شکل ۱). میزان ماده‌ی آلی شده در نمونه‌ها کمتر از ۲ درصد بود. خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌های خاک در جدول ۳ ارائه شده است.

اندازه‌گیری شده
خصوصیات فیزیکی
در جدول ۳ ارائه



شکل ۱- محل قرارگیری نمونه‌های خاک مطالعه‌شده بر روی مثلث بافت خاک USDA.

جدول ۳- کلاس بافتی خاک و مقادیر میانگین برخی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مطالعه شده.

تخلخل کل	جرم مخصوص		رس	سیلت (%)	شن	تعداد نمونه	بافت
	ظاهری	حقیقی					
۰/۵	۱/۲۴	۲/۵	۳۵	۵۳	۱۲	۶	لوم رسی سیلتی
۰/۵	۱/۲	۲/۶	۲۶	۳۴	۴۰	۵	لوم
۰/۵۴	۱/۲	۲/۶	۲۹	۳۴/۵	۳۶/۵	۵	لوم رسی
۰/۵۴	۱/۲	۲/۱	۴۲	۴۵/۵	۱۲/۵	۵	رس سیلتی
۰/۵۸	۱/۳	۲/۵۷	۴۷	۲۸	۱۵	۷	رس
۰/۴۵	۱/۴	۲/۶۶	۱۷	۱۷	۶۶	۵	لوم شنی

است مقدار b در مدل کمپل نیز از روند مشابهی تبعیت کرده است. مقدار n در مدل ون گنوختن نیز از سنگین بافتها به سمت سبک بافتها افزایش پیدا کرده است. در پژوهش گارسیا و همکاران (۲۰۱۴) مقادیر n از ۱/۲ از سنگین بافت به ۲/۲۷ به سبک بافت افزایش و مقدار m از ۰/۱۸۷ از سنگین بافت به ۰/۵۶ به سبک بافت افزایش یافته است. در پژوهش میناسنی و براتنی (۲۰۰۷) عنوان شده است که با افزایش درصد شن مقدار n افزایش می‌یابد. در پژوهش گنجی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است که بین پارامتر n مدل ون گنوختن و پارامتر λ مدل بروکس و کوری با درصد سیلت همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. از آنجایی که پارامتر n مدل ون گنوختن و پارامتر λ مدل بروکس و کوری در ارتباط با توزیع منافذ خاک و پارامتر b مدل کمپل در ارتباط با درصد ذرات خاک و جرم مخصوص ظاهری خاک است، تغییر در مقادیر پارامترها را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی مذکور در نمونه‌های مورد مطالعه نسبت داد. ضرایب سایر مدل‌های مطالعه شده در جدول ۴ آورده شده است.

بررسی کارایی مدل‌های منحنی رطوبتی خاک

در تخمین رطوبت با استفاده از شاخص‌های آماری، اختلاف مقادیر رطوبت‌های مشاهداتی و تخمینی (نتایج حاصل از اعتبارسنجی پارامترهای برآوردی) در نقاط مختلف مکش ماتریک بیانگر میزان دقت مدل‌ها در

برآورد ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی خاک

مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین ضرایب مدل‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود پارامتر m در مدل ون گنوختن با m مستقل از ۰/۰۶ در بافت لوم شنی تا ۰/۳۹ در بافت لوم رسی سیلتی تغییر می‌کند. مقدار برآوردی این پارامتر در مدل ون گنوختن با $m=1-2/n$ از ۰/۰۸ در بافت رس سیلتی تا ۰/۱۱ در لوم شنی متغیر است. مقادیر برآوردی در مدل فردلاند و ژیانگ برای این پارامتر از ۰/۲۶۶ در بافت رس سیلتی تا ۰/۹۳ در بافت لوم شنی تغییر می‌یابد. مقادیر برآوردی پارامتر n در سه مدل ون گنوختن با m مستقل، ون گنوختن با $m=1-2/n$ و فردلاند و ژیانگ به ترتیب از ۰/۵۵ در بافت لوم رسی سیلتی تا ۳/۹۸ در بافت لوم شنی، از ۲/۱۷ در بافت لوم رسی تا ۲/۲۵ در بافت لوم شنی، از ۰/۵۴ برای بافت لوم شنی تا ۱/۹۷ برای بافت رس سیلتی متغیر است. به طور کلی مقادیر m و n در مورد بافت سبک مورد مطالعه بیشتر از بافت‌های سنگین است. در مدل بروکس و کوری λ از ۰/۱۸ در بافت رس سیلتی تا ۰/۲۵ در بافت لوم شنی متغیر است. در مدل کمپل b از ۰/۱۴ برای بافت رس سیلتی تا ۰/۲ برای بافت لوم شنی تغییر می‌کند. در پژوهش داوری و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر λ در مدل بروکس و کوری از ۰/۳۱ برای سبک بافت لوم شنی تا ۰/۱۸ برای سنگین بافت رس سیلتی متغیر بوده

برای مدل‌های مختلف آورده شده است. با توجه به این جدول تمامی مدل‌ها کم برآوردی را نشان می‌دهند. کمترین میزان خطا مربوط به مدل فردلاند ژیانگ و درپسن و ون گنوختن با m مستقل و بیشترین میزان خطا مربوط به مدل نمایی است.

تخمین رطوبت می‌باشد. میزان بیش برآوردی و کم برآوردی رطوبت با استفاده از شاخص MBE مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقادیر مثبت شاخص MBE نشان‌دهنده کم برآوردی و مقادیر منفی نشان‌دهنده بیش برآوردی مدل می‌باشد. در جدول ۵ این مقادیر

جدول ۴- مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی خاک ($n=33$).

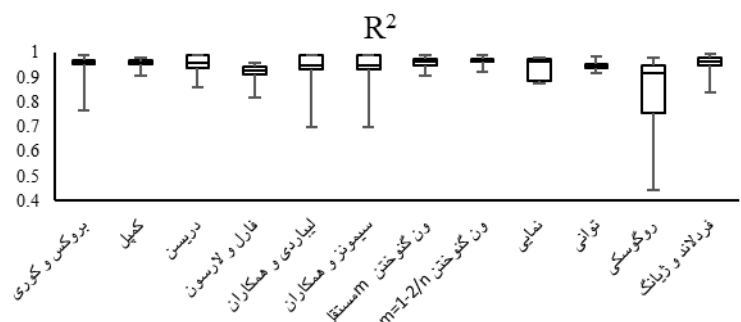
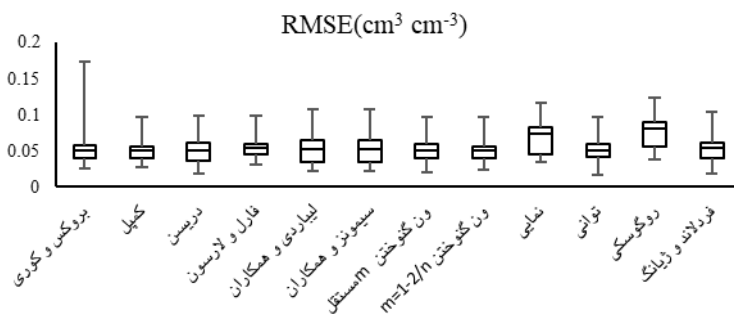
مدل		ضرایب برآورد شده‌ی مدل		مدل	ضرایب برآورد شده‌ی مدل	
		λ			n	m
ون گنوختن m مستقل		۰/۱۸- ۰/۲۵ (۰/۲۲)	بروکس و کوری		۰/۵۵- ۳/۹۸ (۱/۲۸)	۰/۰۶- ۰/۳۹ (۰/۲۴)
ون گنوختن $m=1-2/n$		b ۵/۱- ۶/۹۶ (۵/۸۷)	کمپل		۲/۱۷- ۲/۲۵ (۲/۲۱)	۰/۰۸- ۰/۱۱ (۰/۰۹۶)
فردلاند و ژیانگ		γ (۰/۰۱)	درپسن	ψ_r ($1/6 \times 10^4$)	n ۰/۵۴- ۱/۹۷ (۰/۸۲۵)	m ۰/۲۶۶- ۰/۹۳ (۰/۶۴۶)
فارل لارسون		β (-۲۴)- (-۳۲) (-۲۸)	α ۲- ۱۲ (۵/۵)	لیباردی و همکاران		α γ
سیمونز و همکاران		β (۲۶)	α (۲۲۸۵۴۵۰)	نمایی	β - (-۳۲) (-۲۴) (-۲۸)	α ۲- ۱۲ (۵)
توانی		Ψ_{15} (۱۲۶۷۰)	روگوسکی		β (۷)	α (۰/۰۸)

جدول ۵- مقادیر شاخص MBE ($cm^3 cm^{-3}$) برای مدل‌های مختلف.

مدل منحنی رطوبتی خاک	ون گنوختن (n و m مستقل)	ون گنوختن با $m=1-2/n$	فردلاند و ژیانگ	بروکس و کوری	کمپل	درپسن
مدل منحنی رطوبتی خاک	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۷۳
مدل منحنی رطوبتی خاک	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۲۹

سیمونز و همکاران و فارل و لارسون داشته است. این محققین مدل بروکس و کوری را به عنوان ضعیف‌ترین مدل در تخمین رطوبت‌های حجمی در بین مدل‌های ذکر شده عنوان کرده‌اند. این در حالی است که در پژوهش حاضر با به کارگیری کل داده‌ها، این مدل به لحاظ دقت تخمین در مرتبه بالایی قرار دارد. در پژوهش لیج و همکاران (۱۹۹۶) نیز گزارش شده است که مدل ون-گنوختن در برآورد منحنی رطوبتی خاک از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. این محققین همچنین گزارش کردند که مدل ون‌گنوختن با m مستقل در مقایسه با مدل‌های با m محدود بهتر جواب می‌دهد. در مطالعه‌ی باقارلو و لوینو (۲۰۱۲) پارامترهای هیدرولیکی حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر مدل ون-گنوختن با m محدود تخمین خوبی از رطوبت حجمی ارائه داده است. بهمنی و رضانی (۲۰۱۴) در پژوهشی که بر روی خاک‌های ریز و متوسط بافت انجام دادند، گزارش کردند که مدل‌های سیمونز و همکاران، فارل و لارسون و لیباردی و همکاران در تمام بافت‌های مطالعه شده دارای دقت بالا و نتایج نزدیک به هم بودند. در حالی که مدل‌های توانی، روگوسکی و نمایی دارای عملکرد ضعیف‌تری بودند. در مجموع بخشی از نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات پیشین هم‌خوانی دارد.

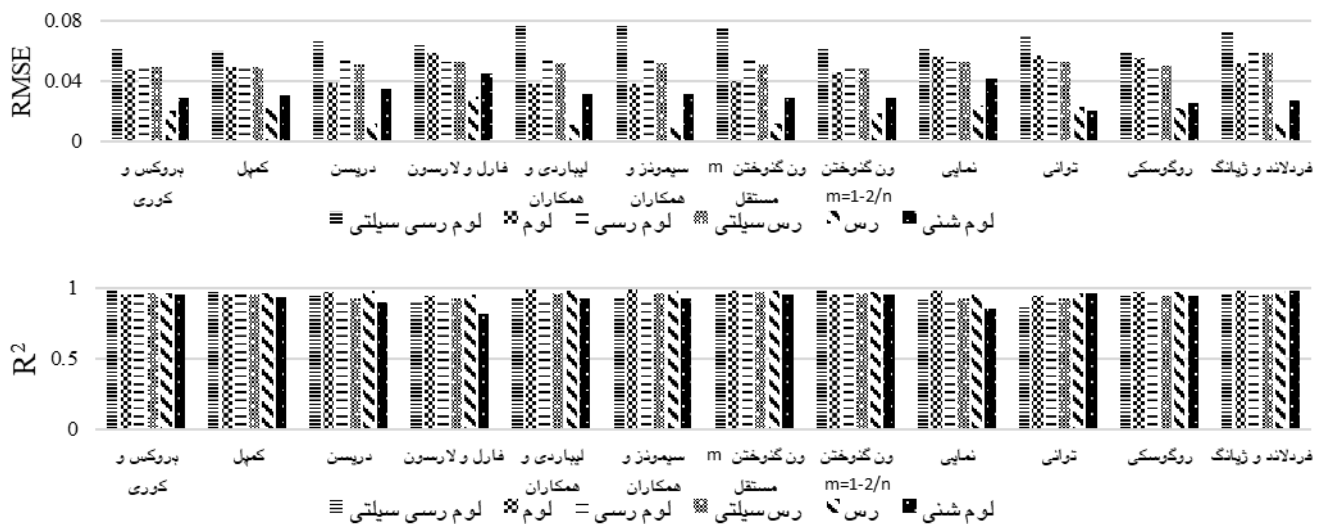
جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) شاخص دیگری جهت بررسی میزان خطای برآوردی مدل است. ضریب تعیین (R^2) میزان همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی را نشان می‌دهد و هر چه به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده‌ی دقت تخمین بالاست. با توجه به شکل ۲ در نمودار RMSE مقادیر خطا در مدل‌های بروکس و کوری، کمپل، فارل و لارسون، ون‌گنوختن، توانی و فردلاندر ژیانگ در اطراف خط میانه تمرکز یافته‌اند و میزان پراکندگی داده‌ها در بقیه‌ی مدل‌ها بیشتر است. به جز مدل‌های نمایی و روگوسکی میانه‌ی خطای مدل‌ها بر روی یک خط قرار دارند و خطای برآوردی دو مدل مذکور بیشتر از سایر مدل‌هاست. با توجه به نمودار R^2 میزان پراکندگی داده‌های ضریب تعیین دو مدل روگوسکی و نمایی و اختلاف آن‌ها با عدد یک بیشتر از سایر مدل‌هاست. بیات و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی که روی دقت برازش چند مدل منحنی رطوبتی خاک با به کارگیری خاک‌های ریز و متوسط بافت انجام دادند، گزارش کردند که در بین مدل‌های فردلاندر و ژیانگ، کمپل، ون‌گنوختن و بروکس و کوری، کمترین خطای تخمین مربوط به مدل فردلاندر و ژیانگ است. در پژوهش نبی‌زاده و بیگی هرچگانی (۲۰۱۱)، مدل ون-گنوختن بهترین عملکرد را در بین مدل‌های ون‌گنوختن، لیباردی و همکاران، توانی، کمپل، بروکس و کوری،



شکل ۲- نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های RMSE و R^2 .

خاک لوم شنی در مکش‌های بالا تخمین خوبی از رطوبت خاک را ارائه می‌دهند. نمودار مربوط به سایر بافت‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهند. با توجه به کمترین میزان خطای برآورد و بالاترین میزان ضریب تعیین مطابق شکل ۳ برای بافت لوم رسی سیلتی مدل بروکس و کوری با RMSE برابر ۰/۰۶ و R^2 برابر ۰/۹۸، برای بافت لوم مدل لیباردی و همکاران و سیمونز و همکاران با مقادیر RMSE برابر ۰/۰۳۸ و R^2 برابر ۰/۹۹، برای بافت لوم رسی مدل‌های بروکس و کوری و کمپل با RMSE برابر ۰/۰۴۹ و R^2 برابر ۰/۹۶، برای بافت رس سیلتی مدل ون‌گنوختن $m=1-2/n$ و بروکس و کوری با RMSE برابر ۰/۰۴۸ و R^2 برابر ۰/۹۶، برای بافت رس مدل‌های لیباردی و همکاران و سیمونز و همکاران با RMSE برابر ۰/۰۱ و R^2 برابر ۰/۹۸ و برای بافت لوم شنی مدل توانی با RMSE برابر ۰/۰۲ و R^2 بالاترین دقت تخمین را داشتند.

نمودار ستونی، خطای تخمین رطوبت مدل‌ها را به تفکیک گروه‌های بافتی خاک نشان می‌دهد. مقادیر خطا برای تمامی بافت‌ها و در تمامی مدل‌ها کمتر از ۸ درصد است و تمامی مدل‌ها در تخمین رطوبت خاک عملکرد مطلوبی دارند. میزان خطای تخمین مدل‌ها برای بافت رس کمتر از سایر بافت‌هاست و بافت لوم شنی در مرتبه‌ی بعد قرار دارد. میزان خطای برآوردی در بافت لوم رسی سیلتی بیشتر از سایر بافت‌های خاک است. با توجه به نمودارهای شکل ۴ نمودار مربوط به بافت لوم شنی با تفاوت بیشتری نسبت به سایر نمودارها رسم شده است و برای این بافت رطوبت در تمام نقاط کمتر از رطوبت‌های مشاهداتی تخمین زده شده است ولی نقاط تخمینی به نقاط مشاهداتی نزدیکتر است. برای این بافت خاک در تمامی نمودارهای مدل‌ها شکل سیگموئیدی منحنی مانند سایر بافت‌ها بدست نیامده است و دلیل خطای برآوردی پایین می‌تواند به نبود نقاط مشاهداتی در نزدیکی رطوبت اشباع مربوط باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت مدل‌های منحنی رطوبتی در



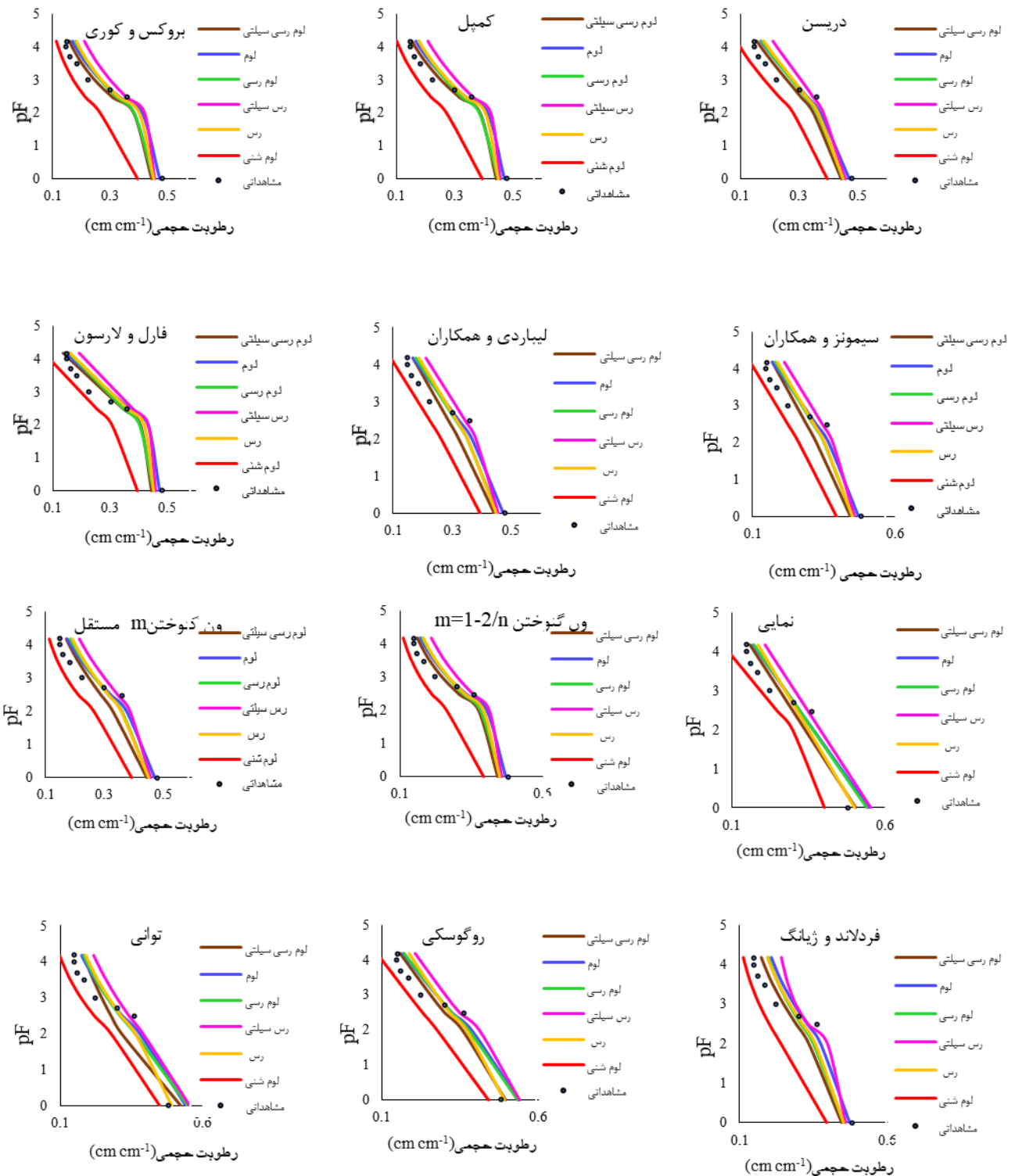
شکل ۳- نمودار ستونی RMSE و R^2 برای مدل‌ها به تفکیک شش کلاس بافتی.

مقادیر ۲۰٪ تا ۳۰٪ شبیه‌سازی متوسط و مقادیر بیش از ۳۰٪ شبیه‌سازی ضعیف مدل را نشان می‌دهد با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۶ شبیه‌سازی برای بافت

در مورد شاخص NRMSE (درصد خطا) به طور کلی مقادیر کمتر از ۱۰٪ بیانگر شبیه‌سازی عالی توسط مدل است. مقادیر بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ شبیه‌سازی خوب،

گروه کلاس بافتی خاک ضرایب مدل‌های پیشنهادی در جدول ۷ آورده شده است.

رس در سطح عالی، برای بافت لوم شنی در سطح خوب و برای بافت لوم رسی سیلتی در سطح متوسط است. برای بقیه‌ی بافت‌ها برخی مقادیر شبیه‌سازی خوب و برخی شبیه‌سازی متوسط را نشان می‌دهند. برای شش



شکل ۴- منحنی‌های رطوبتی خاک از ۱۲ مدل مختلف و مقادیر مشاهداتی برای شش

جدول ۶- مقادیر شاخص NRMSE (درصد) برای ۱۲ مدل و شش کلاس بافتی خاک.

ون گنوختن m مستقل	ون گنوختن با $m=1-2/n$	فردلاند و ژیانگ	بروکس و کوری	کمپل	دریسن	بافت خاک
۲۹	۲۴/۱۳	۲۸/۶۵	۲۳/۷	۲۳/۴	۲۶/۶	لوم رسی سیلتی
۱۶/۵۹	۱۹	۲۱/۲۲	۱۹/۷	۲۰/۱۸	۱۶/۲۱	لوم
۲۱/۴۱	۱۹/۷۶	۲۳/۵۴	۱۹/۶۱	۱۹/۵۵	۲۱/۲۰	لوم رسی
۱۸/۵۲	۱۷/۶۹	۲۱/۳۶	۱۷/۷۹	۱۷/۸	۱۸/۷۱	رس سیلتی
۳/۹۹	۶/۵۷	۴/۲۱	۷/۲۴	۷/۸۵	۴/۰۳	رس
۱۴/۸۷	۱۴/۸۵	۱۳/۷۱	۱۴/۸۶	۱۵/۷۹	۱۷/۸۸	لوم شنی
فارل و لارسون	لیباردی و همکاران	سیمونز و همکاران	نمایی	توانی	روگوسکی	بافت خاک
۲۴/۸	۲۹/۷	۲۹/۷	۲۴/۴۶	۲۷/۴	۲۳/۱۷	لوم رسی سیلتی
۲۴/۲۶	۱۵/۸۶	۱۵/۸۶	۲۳/۰۱	۲۳/۴۶	۲۲/۹۳	لوم
۲۰/۸۵	۲۲/۴۳	۲۲/۴۳	۲۰/۷۱	۲۰/۷۹	۱۹/۶۸	لوم رسی
۱۹/۰۳	۱۸/۹۱	۱۸/۹۱	۱۹/۰۵	۱۹/۳۳	۱۸/۱۸	رس سیلتی
۱۰/۴۴	۳/۷۷	۳/۷۷	۸/۳۴	۷/۹۱	۷/۶۴	رس
۲۳/۲۲	۱۶/۱۳	۱۶/۱۳	۲۱/۱۳	۱۰/۵۴	۱۲/۸۸	لوم شنی

جدول ۷- ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی منتخب از بین ۱۲ مدل برای خاک‌های دشت قروه-دهگلان به تفکیک گروه‌های بافتی.

بافت خاک			مدل			ضرایب		
						β	α	n
								b
								λ
لوم رسی سیلتی			بروکس و کوری					۰/۲۴
لوم			لیباردی و همکاران			-۲۴/۸۴	۷/۸۳	
لوم رسی			سیمونز و همکاران			-۲۴/۸۴	۷/۸۳	
			بروکس و کوری					۰/۱۷۹
			کمپل					۰/۱۵۷
رس سیلتی			ون گنوختن $m=1-2/n$					۲/۱۷۹
			بروکس و کوری					۰/۱۸
رس			لیباردی و همکاران			-۲۹/۷۸	۵/۴۹	
			سیمونز و همکاران			-۲۹/۷۸	۵/۴۹	
لوم شنی			توانی			۴/۸۳	۰/۲۱	

نتیجه‌گیری کلی

بیشترین مقدار R^2 ، برای بافت لوم و رس دو مدل لیباردی و همکاران و سیمونز و همکاران، برای بافت لوم رسی سیلتی مدل بروکس و کوری، برای بافت لوم رسی مدل‌های بروکس و کوری و کمپل، برای بافت رس سیلتی مدل‌های ون گنوختن با $m=1-2/n$ و بروکس و کوری و برای بافت لوم شنی مدل توانی معرفی گردید. بر اساس معیار NRMSE برای مدل‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی منحنی مدل معرفی شده برای بافت لوم رسی سیلتی در سطح متوسط، برای بافت رس و لوم شنی در سطح عالی و برای بقیه‌ی بافتها در سطح خوب نتیجه‌گیری شد. ضرایب مربوط به مدل‌های انتخاب شده برای تخمین رطوبت خاک‌های منطقه‌ی مطالعه شده معرفی گردید.

با توجه به شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و NRMSE دقت تخمین مدل‌های منحنی رطوبتی خاک در اراضی دشت قروه-دهگلان به‌وسیله‌ی برخی از مدل‌های ارائه شده در این زمینه بررسی شد. بیشترین خطای تخمین مدل‌های مطالعه شده در حدود ۸ درصد بود. بدون در نظر گرفتن کلاس بافتی خاک مدل‌های منحنی رطوبتی در مقایسه با یکدیگر عملکرد نسبتاً مشابهی داشتند و مدل‌های نمایی و روگوسکی بیشترین میزان خطای تخمین را نشان دادند. در کلاس‌های بافتی مختلف نتایج تخمین برای بافت رس مطلوب‌تر بود و برای بافت لوم رسی سیلتی بیشترین خطای تخمین مدل‌ها مشاهده شد. در انتخاب مدل‌ها برای هر کدام از کلاس‌های بافتی خاک بر اساس کمترین مقدار RMSE و

منابع مورد استفاده

- Bagarello V and Lovino M, 2012. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. *Geoderma* ۱۸۷-۱۸۸:67-76.
- Bahmani O and Ramazani B, 2014. Evaluating performance of pedotransfer functions in estimating soil moisture retention curves of different soils using SWRC model. *Water Research in Agriculture* 28: 773-785. (In Persian with English abstract).
- Banimahd A, Khalili D, Hagigi A and Parsa Sh, 2014. Comparison of estimating experimental models of groundwater potential recharge in semi-arid area using lysymmetric data. *Journal of Water and Soil Science* 18:315-324. (In Persian with English abstract).
- Bayat H, Ebrahimi E, Rastgo M, Zare Abyaneh H and Davatgar N, 2013. Fitting different soil water characteristic curve models to the experimental data of various textural classes of Guilan province soils. *Water and Soil Science—University of Tabriz* 23: 151-167. (In Persian with English abstract).
- Brooks RH and Corey AT, 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers* 3: 1-27.
- Bruce RR and Luxmore RJ, 1986. Physical and Mineralogical Methods. Pp. 663-686. In: Klute A (eds). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America. Madison. WI.
- Clapp RB and Hornberger GM, 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14: 601-604.
- Campbell GS, 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science* 117: 311-314.
- Cao H and Yue X, 2014. Homogenization of Richard's equation of Van Genuchten-Mualem model. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 412: 391-400.
- Carsel RF and Parrish RS, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24: 755-769.
- Davari M, Zalvae Z and Mahmoodi M, 2018. A comparison between empirical and fractal models fitted to the measured soil moisture characteristic curve data. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50: 847-862. (In Persian with English abstract).
- Driessen PM and Konijn NT, 1992. *Land Use System Analysis*. Interdisciplinary Research INRES. Wageningen Agricultural University.

- Farrel DA and Larson WE, 1972. Modeling the pore structure of porous media. *Water Resources Research* 8: 699-706.
- Ganji S, Bayat H and Sedaghat A, 2019. Application and comparison of international pedotransfer functions for Mazandaran and East Azerbaijan soils. *Water and Soil Science–University of Tabriz* 28: 196-209. (In Persian with English abstract).
- Garcia G, Pachepsky Y and Vereecken H, 2014. Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture. *Journal of Hydrology* 516: 154-160.
- Khorsand A, Rezaverdinejad V, Asgarzadeh H, Majnooni-Heris A, Rahimi A and Besharat S, 2019. Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management* 224: 105740. (In Persian with English abstract).
- Kravchenko A and Zhang R, 1998. Estimating the soil water retention from particle size distribution: a fractal approach. *Soil Science* 163: 171-179.
- Leij F, Russell W and Lesch S, 1997. Closed form expressions for water retention and conductivity data. *Groundwater* 35: 848-858.
- Leong EC and Rahardjo H, 1997. Review of soil water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123: 1106-1117.
- Libardi PL, Reichardt K and Nascimento Filho VF, 1979. Analise da redistribuicao da agua visando a condutividade hidraulica do solo. *Energia Nuclear e Agricultura* 1: 108-122.
- Minasney B and Bratney A, 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1105-1110.
- Nabizadeh E and Beigi Harchegani H, 2011. The fitting quality of several water retention models in soil samples from Lordegan, Charmahal-Va-Bakhtiari. *Journal of Water and Soil* 25: 634-645. (In Persian with English abstract).
- Naghavi H, Afyuni M, Hajabassi MA and Abedi G, 2003. Estimation of soil water retention curve in unsaturated zone by inverse solution. *Iranian Journal of Soil and Water Sciences* 17: 58-67. (In Persian with English abstract).
- Rawls WJ, Brakensiel D and Saxton K, 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions, ASAE* 25: 1316-1320.
- Rezaei A, Neishabouri MR and Jafarzadeh AA, 2001. Evaluation of Campbell model to determine soil water characteristics curve. *Iranian Journal of Agriculture Science* 32: 541-550. (In Persian with English abstract).
- Rogowski AS, 1971. Watershed physics: model of soil moisture characteristics. *Water Resource Research* 7: 1575-1582.
- Rooij GH, 2002. Physical Methods. Pp.663-686. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America. Madison. WI.
- Rossi C and Nimmo J, 1994. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resources Research* 30: 701-708.
- Shakhali F, Khaledian M, Navabian M and Shahinrokhshar P, 2016. Simulation of soil volumetric water content by HYDRUS-2D under line source with different salinities of irrigation water and comparison with field observations. *Journal of Water and Soil Science* 20:129-140. (In Persian with English abstract).
- Simmons CS, Nielson DR and Biggar JW, 1979. Scaling of field measured soil water properties. I. *Methodology*. *Hilgardia* 47: 77-102.
- Taran F, Nazemi A and Sadraddini AA, 2013. Comparison of four dispersion coefficient models in mathematical analysis of contaminant transport in heterogeneous soils. *Water and Soil Science – University of Tabriz* 23: 249-260. (In Persian with English abstract).
- Van Genuchten MTh, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.