

کیفیت برازش چند مدل تجربی منحنی رطوبتی به خاک‌های شهرستان لردگان از استان چهارمحال و بختیاری

الهام نبی زاده^{۱*} - حبیب الله بیگی هرچگانی^۲

تاریخ دریافت: ۸۹/۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱

چکیده

منحنی رطوبتی خاک یک خصوصیت پایه‌ای برای مطالعه‌ی آب قابل دسترس برای گیاه، پدیده‌های نفوذ، زهکشی و حرکت مواد محلول در خاک است. با اینکه مطالعات زیادی در زمینه‌ی منحنی رطوبتی خاک‌ها به ویژه خارج از ایران انجام شده است، تاکنون مطالعه‌ی روی کیفیت برازش مدل‌های منحنی رطوبتی در خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری صورت نگرفته است. هدف از این مطالعه مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های مختلف منحنی مشخصه‌ی رطوبتی (ون گنوختن، لیباردی و همکاران، توانی بروس-لاکسمور، کمبل، بروکس-کوری، سایمونز و همکاران و فارل-لارسون) و انتخاب مدل‌های مناسب در خاک‌های لردگان بود. پنجاه نمونه از خاک‌های دشت لردگان جمع‌آوری و کلاس بافت آنها که شامل لوم شنی، لوم سیلتی، سیلت، لوم، لوم رسی سیلتی و رسی سیلتی بودند، تعیین شدند. مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی با استفاده از نرم افزار SWRC 3.0 به داده‌های رطوبت-مکش حاصله از ستون‌های آب آویزان و دستگاه صفحه‌ی فشاری برازش داده شدند. کیفیت برازش مدل‌های مورد نظر با محاسبه‌ی R^2 و RMSE به دست آمد. همه‌ی مدل‌ها عملکرد خوبی داشتند به طوری که مقادیر R^2 بین ۰/۹۰ تا ۱/۰۰ و مقادیر RMSE بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۳۶ $cm^3 cm^{-3}$ حاصل شد. در همه‌ی نمونه‌ها و همه‌ی کلاس‌های بافت خاک، مدل ون گنوختن با حداقل ضریب تعیین (R^2) و حداکثر خطای (RMSE) و مدل بروکس-کوری با حداقل ضریب تعیین (R^2) و حداکثر خطای (RMSE) بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. هرچند R^2 مدل بروکس-کوری همیشه بیشتر از ۰/۹۰ و RMSE آن کمتر از $0.036 cm^3 cm^{-3}$ بود. بنابراین استفاده از مدل ون گنوختن برای خاک‌های دشت لردگان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: منحنی رطوبتی خاک، مدل، ون گنوختن، بروکس-کوری، کیفیت برازش

مقدمه

دسترس برای گیاه، پدیده‌های نفوذ، زهکشی، هدایت هیدرولیکی، آبیاری، تنش آبی گیاهان و حرکت مواد محلول در خاک است. منحنی رطوبتی کاربردهای زیادی در زمینه‌ی کشاورزی (تخمین مقدار آب قابل دسترس برای گیاه) و محیط زیست (مدل‌سازی جریان آب در منطقه غیراشباع) دارد. اخیراً در تحقیقات مربوط به پوشش گیاهی و تغییرات هیدرولژیکی ناشی از تغییر آب و هوا، توزیع مکانی منحنی رطوبتی خاک به عنوان یک مولفه‌ی مهم مطرح شده است (۲۲).

بیان ریاضی منحنی رطوبتی به شکل یک تابع مزایا و کاربردهای زیادی دارد. ضرایب تابع بیان‌کننده‌ی رفتار رطوبتی خاک طی خشک شدن است و در برنامه‌نویسی نرم‌افزارهای حرکت آب و املاح به کار می‌روند. مدل‌های ریاضی بسیاری برای منحنی رطوبتی خاک پیشنهاد شده است (۱۱ و ۳۲). مدل‌های منحنی رطوبتی ممکن است به دو صورت بیان شوند:

• رطوبت تابعی از مکش یا پتانسیل ماتریک خاک است:

برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولژیکی و تشریح معادلات جریان آب در خاک‌های غیراشباع استفاده از دو خصوصیت مهم هیدرولیکی خاک یعنی تابع منحنی مشخصه‌ی رطوبتی و توابع هدایت هیدرولیکی لازم است. از آنجایی که با استفاده از معادلات منحنی رطوبتی می‌توان توابع هدایت هیدرولیکی را تعریف کرد، منحنی رطوبتی یکی از اساسی‌ترین مشخصه‌های هیدرولیکی هر خاک به شمار می‌رود.

منحنی رطوبتی رابطه‌ی میزان رطوبت خاک را با مکش ماتریک خاک نشان می‌دهد و یک خصوصیت پایه‌ای برای مطالعه‌ی آب قابل

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*- نویسنده مسئول: (Email: elham.nabizadeh@gmail.com)

استفاده از منحنی دانه‌بندی تخمین زد و این روش را برای خاک‌های ریز بافت مناسب دانست. از دو پژوهش اخیر چنین بر می‌آید که بافت خاک می‌تواند بر عملکرد مدل‌های منحنی رطوبتی موثر باشد.

کشکولی و زینال‌زاده (۸) قابلیت برآزش دو مدل تجربی ساکستون و همکاران (۲۹)، و هاتسون و کاس (۲۱) (این دو مدل منحنی رطوبتی را با استفاده از اطلاعات سهل‌الوصول مانند بافت خاک تخمین می‌زنند) را با مدل ون‌گنوختن (۳۳) مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که به ترتیب مدل‌های ون‌گنوختن، ساکستون و همکاران، و هاتسون و کاس بهترین برآزش را دارند.

افراسیاب (۲) با استفاده از مثلث بافت شیرازی و بورسما و اطلاعاتی مانند بافت و جرم مخصوص ظاهری خاک اقدام به واسنجی مدل کمبل نمود و نتیجه گرفت که مدل در مکش‌های پایین، دقیق‌تر از مکش‌های بالا عمل می‌نماید. همچنین از آنجایی که مدل کمبل بر نقاط ابتدایی و انتهایی منحنی تطابق بهتری داشت، استفاده از این مدل را برای پیش‌بینی مقدار رطوبت در دو نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم توصیه کرد. رضایی و همکاران (۴) به ارزیابی مدل کمبل در خاک‌های دشت سراب ایران پرداختند و نتایج آزمایشگاهی منحنی رطوبتی را با مدل فیزیکی-تجربی کمبل مقایسه کردند. در نهایت مشخص شد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از مدل کمبل تفاوت معنی‌داری ندارند و استفاده از مدل کمبل را توصیه کردند.

ترابی فارسانی و قهرمان (۳) کارایی چهار مدل متداول خارجی: راولز و براکنسیک، وریکن و همکاران، وستن و وستن و همکاران و مدل‌های داخلی: قربانی‌دشتکی و همایی، فرخیان‌فیروزی و همایی را بررسی کردند و از آنجایی که نتایج به دست آمده چندان مطلوب نبودند، بر لزوم تهیه توابع انتقالی مناسب برای خاک‌های گچی و آهکی ایران تاکید کردند. قربان و همکاران (۶) و (۷) منحنی رطوبتی را با استفاده از هندسه فراکتالی پیش‌بینی نمودند و عنوان کردند که مدل پرفکت از میان مدل‌های تجربی بیشترین دقت را دارد.

با توجه به مطالعات فوق، و از بررسی منابع چنین برمی‌آید که کمتر به مقایسه‌ی آماری مدل‌های منحنی رطوبتی پرداخته شده است. از این‌رو، مقایسه‌ی کارایی مدل‌های منحنی رطوبتی برای خاک‌های مناطق مختلف ایران به‌ویژه خاک‌های آهکی ضروری است.

دشت لردگان که یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری محسوب می‌شود. دارای خاک‌های تکامل یافته‌ای است که علاوه بر افق‌های سطحی، افق‌های کلاسیک و آرجیلیک نیز در آن وجود دارد. دامنه‌ی کربنات کلسیم معادل در این خاک‌ها از ۴ تا ۶۲ درصد متغیر بوده و به طور میانگین ۲۹ درصد است (۹). اراضی قابل آبیاری در این دشت عمدتاً زیر کشت محصولاتی نظیر گندم، یونجه، لوبیا و ذرت است. علی‌رغم اهمیت زراعت آبی در

از جمله‌ی این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های بروکس-کوری (۱۱)، گاردنر (۱۶)، روگوسکی (۲۷) و ون‌گنوختن (۳۳) اشاره کرد.

• مکش یا پتانسیل تابعی از رطوبت خاک است: $\psi = f(\theta)$ ، از جمله‌ی این مدل‌ها می‌توان از مدل‌های کمبل (۱۳)، نمای بروس-لاکسمور (۱۲)، فارل-لارسون (۱۵)، لیاردی و همکاران (۲۳)، توانی بروس-لاکسمور (۱۲) و سایمونز و همکاران (۳۰) نام برد.

در صورتی که اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به حد کافی فراهم باشد، توسعه و همچنین استفاده از این مدل‌ها آسان است. با این حال، قابلیت استفاده و دقت این مدل‌ها محدود به ناحیه و وابسته به اندازه‌ی نمونه و بزرگی داده‌های اولیه است (۱۸). از میان این مدل‌ها، برخی مانند توابع بروکس-کوری (۱۱) و مدل ون‌گنوختن (۳۳) بیشترین کاربرد را دارند (۲۵).

مدل بروکس-کوری (۱۱) برای خاک‌های نسبتاً درشت بافت با مقادیر بزرگ μ و در مکش‌های زیاد نتایج قابل قبولی می‌دهد اما در نزدیکی نقطه‌ی اشباع به خصوص در خاک‌های ریز بافت با مقادیر کوچک μ نتایج مناسبی نمی‌دهد (۱۷).

به طور کلی مدل‌هایی که شکل سیگموئیدی منحنی رطوبتی را تخمین می‌زنند، در برآورد منحنی رطوبتی موفق‌تر عمل می‌کنند که از جمله‌ی این مدل‌ها، می‌توان به مدل ون‌گنوختن (۳۳) اشاره کرد. این مدل قادر به محاسبه‌ی مقدار مکش در نقطه‌ی ورود هوا به خاک نیست ولی دارای نقطه‌ی عطفی است که باعث عملکرد بهتری نسبت به مدل بروکس-کوری به ویژه در منطقه‌ی نزدیک به اشباع و همچنین مدل کمبل (۱۳) در بسیاری از خاک‌ها می‌شود (۱۱). مدل کمبل نقطه‌ی ورود هوا به خاک را که در ضمن خشک شدن خاک پیش می‌آید، یک نقطه‌ی ناگهانی فرض می‌کند در حالی که در خاک‌های ریز بافت، به تدریج رخ می‌دهد. نیمو (۲۶) و راس و همکاران (۲۸) دریافتند که مدل ون‌گنوختن در رطوبت‌های بالا و متوسط موفق بوده ولی غالباً نتایج ضعیفی در رطوبت‌های پایین دارد.

مانیام و همکاران (۲۴) عملکرد دو مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن (۳۳) و کمبل (۱۳) را در خاک‌های شنی نیجریه با هم مقایسه کردند. آنها دریافتند که دقت مدل کمبل از مدل ون‌گنوختن برای نمونه‌های خاک با درصد شن بالاتر، بیشتر بود. در این مطالعه، برآورد مدل ون‌گنوختن در ناحیه‌ی خشک منحنی رطوبتی (مکش بالا) بیشتر از مقدار واقعی بود اما در ناحیه‌ی مرطوب (مکش کم) عملکرد خوبی نشان داد. این پژوهش نشان می‌دهد که همیشه مدل دارای پارامترهای بیشتر لزوماً دارای کارایی بیشتر نیست.

در ایران نیز مطالعات چندی در زمینه‌ی منحنی رطوبتی صورت گرفته است: ابول‌پور (۱) منحنی رطوبتی دو نمونه‌ی خاک را با

شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۹ تا ۵۰ درجه‌ی شرقی واقع است دارای آب و هوایی نیمه مرطوب با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌هایی نیمه سرد است. میانگین دمای سالانه در این دشت ۱۵ درجه‌ی سلسیوس و میانگین بارش سالانه در آن ۵۰۶ میلی‌متر است. پنجاه نمونه‌ی خاک از عمق ۳۰ سانتی‌متری لایه‌ی سطحی خاک‌های دشت لردگان به صورت تصادفی در تابستان ۱۳۸۷ برداشت شد. نمونه‌های خاک از اراضی با کاربری‌های مختلف مانند اراضی کشاورزی با زراعت آبی و دیم، کنار رودخانه و جنگل جمع‌آوری شدند.

این دشت، تاکنون مطالعه‌ای بر روی منحنی رطوبتی خاک‌های این دشت که از ابزارهای پایه مدیریت آبیاری است صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش (۱) تعیین بهترین مدل منحنی رطوبتی (منحنی رطوبتی) از بین هفت مدل متداول (جدول ۱) برای خاک‌های آهکی (۳۴) دشت لردگان واقع در استان چهارمحال و بختیاری و (۲) بررسی اثر کلاس بافت خاک بر عملکرد این مدل‌ها بود.

مواد و روش‌ها

دشت لردگان که بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۳۱ درجه‌ی

جدول ۱- مدل‌های ریاضی منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	تابع	ضرایب مدل
بروکس-کوری (۱۱)	$0 \leq \psi < \frac{1}{\alpha}$ $\psi \geq \frac{1}{\alpha}$	$\theta_s, \lambda, \alpha, \theta_r$
ون گنوختن (۳۳)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(\alpha\psi)^\lambda}$	$\theta_s, m, n, \alpha, \theta_r$
فارل - لارسون (۱۵)	$\theta = \theta_s$ $\psi < \psi_c$ $\psi \geq \psi_c$	$\theta_s, \psi_c, \alpha, \theta_r$
لیباردی و همکاران (۳۳)	$\psi = \alpha [e^{\beta(\theta - \theta_s)} - 1]$ $\beta < 0$	θ_s, β, α
توانی بروس - لاکسمور (۱۲)	$\psi = \alpha \theta^{-\beta}$ $\psi > 0$	β, α
سایمونز و همکاران (۳۰)	$\psi = \alpha [e^{\beta(\theta - \phi)} - 1]$ $\beta < 0$	ϕ, β, α
کمبل (۱۳)	$\theta = \theta_s$ $\psi < \psi_e$ $\psi \geq \psi_e$	$\theta_s, \lambda, \psi_e$

* در کلیه‌ی مدل‌ها θ_s = رطوبت حجمی اشباع خاک ($cm^3 cm^{-3}$)، θ_r = رطوبت حجمی باقی‌مانده در خاک ($cm^3 cm^{-3}$)، θ = رطوبت حجمی خاک
($cm^3 cm^{-3}$) و $\psi = |\psi_m|$ = مکش ماتریک (cm) است.

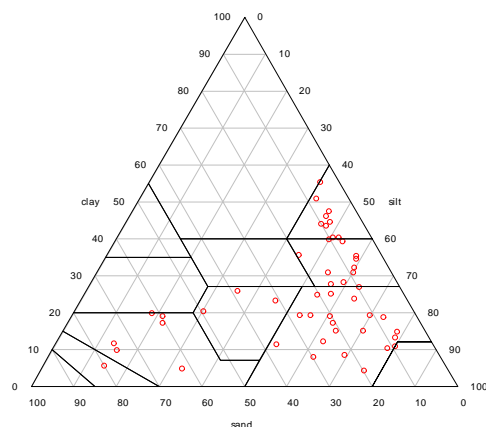
* در مدل بروکس-کوری α = غالباً به عنوان عکس مکش در نقطه‌ی ورود هوا به خاک تعریف می‌شود (۱۱) و λ ضریب توزیع اندازه‌ی منافذ خاک است که بر روی شیب تابع نگهداشت رطوبت تأثیر می‌گذارد. هر چه اندازه‌ی منافذ خاک دارای دامنه‌ی توزیع وسیع‌تری باشد λ کوچک‌تر می‌شود.

* در مدل ون گنوختن α ، n و m ضرایب تجربی ثابتی هستند که بر شکل منحنی رطوبتی تأثیر دارند. در مدل ون گنوختن دو پارامتر α و n به عکس مکش در نقطه‌ی ورود هوا به خاک مرتبط می‌شوند و $n = \lambda + 1$ (۱۱) و $m = 1 - \frac{1}{n}$. ضریب n شیب منحنی رطوبتی S شکل را کنترل می‌کند.

* ضرایب ψ_e و ϕ در مدل‌های فارل - لارسون و سایمونز و همکاران به ترتیب شاخصی از مکش ورود هوا و رطوبت حجمی اشباع خاک هستند. در مدل‌های لیباردی و همکاران، و توانی بروس - لاکسمور و سایمونز و همکاران β ضریب تجربی است.

* در مدل کمبل ψ_e پتانسیل ورود هوا به خاک و λ شیب منحنی رطوبتی خاک است.

تنها در چهار کلاس بافت لوم شنی (SL)، لوم سیلتی (SiL)، لوم رسی سیلتی (SiCL) و رسی سیلتی (SiC) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱- توزیع کلاس‌های بافت نمونه‌های خاک مورد مطالعه

کیفیت برآزش هفت مدل به داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل کیفیت برآزش در محدوده رطوبتی هر کلاس بافت و نیز میانگین R^2 هر مدل نمایش داده شده است. در هر چهار کلاس بافت از میان مدل‌های منحنی رطوبتی، کیفیت برآزش مدل‌های سایمونز (از نمودارهای سمت راست)، ون گنوختن و لیاردی (از نمودارهای سمت چپ) بسیار نزدیک و شبیه به یکدیگر بود. از بین این سه مدل، مدل ون گنوختن بهترین برآزش را داشت.

کلاس بافت نمونه‌های خاک به روش پیپت و منحنی رطوبتی نمونه‌ها با استفاده از ستون‌های آب آویزان و دستگاه صفحه‌ی فشاری تعیین شد. از ستون‌های آب آویزان برای اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک در مکش‌های ۲/۵، ۵، ۱۰ سانتی‌متر و از دستگاه صفحه‌ی فشاری برای اندازه‌گیری رطوبت در مکش‌های ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ سانتی‌متر استفاده شد. علاوه بر این، رطوبت نمونه‌ها در حالت اشباع (مکش صفر) نیز اندازه‌گیری شد.

هفت مدل ون گنوختن (۳۴)، لیاردی و همکاران (۲۲)، توانی بروس-لاکسمور (۱۲)، کمبل (۱۳)، بروکس-کوری (۱۱)، سایمونز و همکاران (۳۱) و فارل-لارسون (۱۵) با استفاده از نرم افزار SWRC 3.0، به روش حداقل مربعات خطا و با الگوریتم نیوتن-رافسون به داده‌های آزمایشی برآزش داده شدند (۱۴).

به منظور تعیین بهترین مدل منحنی رطوبتی از دو معیار R^2 و $RMSE$ که هر دو با استفاده از نرم افزار SWRC 3.0 به دست آمدند، استفاده شد (۱۴). برای ترسیم نمودارهای منحنی‌های رطوبتی و نمودارهای ۱:۱ از نسخه‌ی 8.0 نرم‌افزار STATISTICA استفاده شد (۳۱).

نتایج و بحث

بعد از اندازه‌گیری فراوانی نسبی اجزای شن، سیلت و رس، کلاس‌های بافت هر یک از نمونه‌های خاک مورد مطالعه تعیین شد. توزیع کلاس‌های بافت در نمودار مثلثی شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین ویژگی‌های خاک‌های آهکی دشت لردگان در جدول ۲ داده شده است.

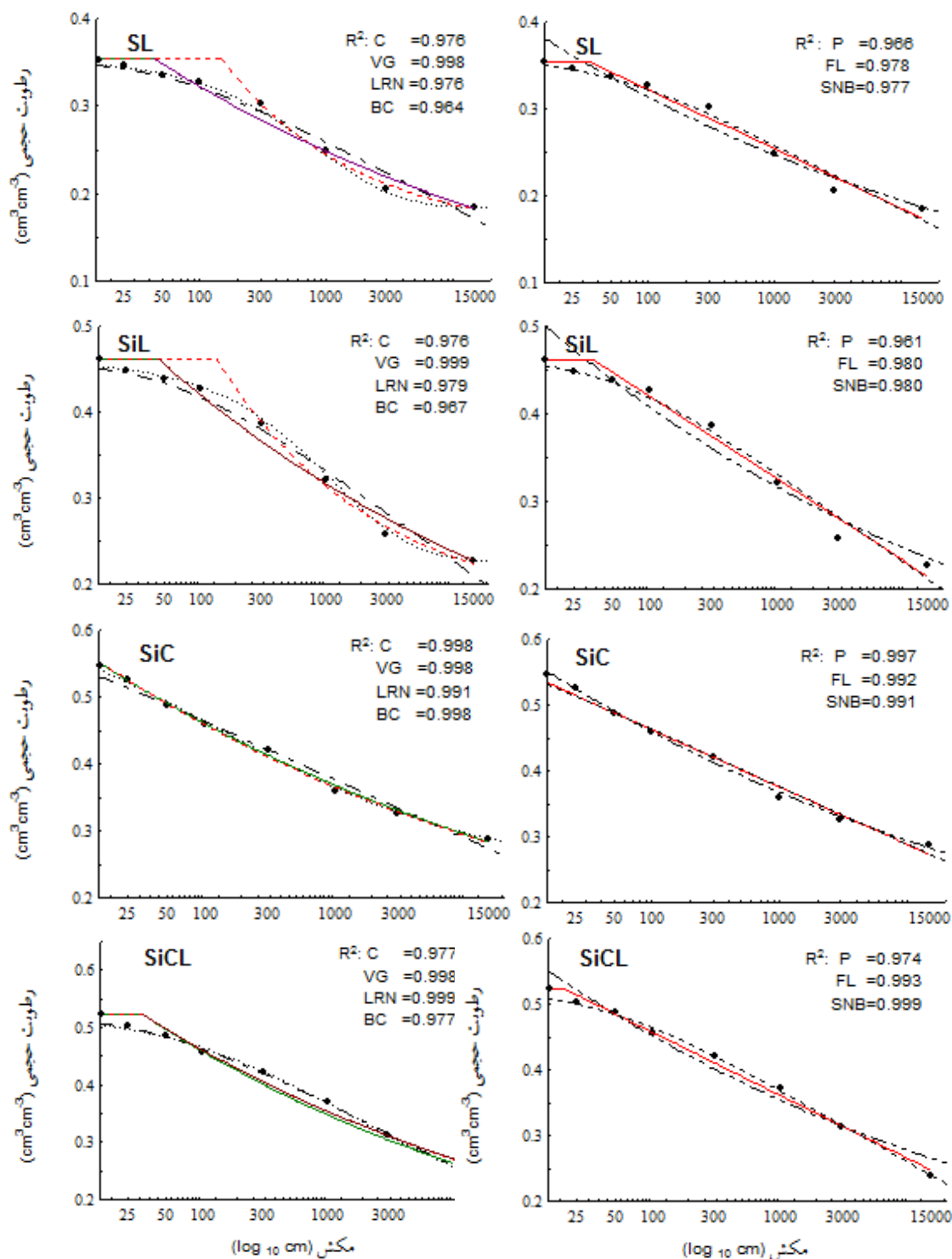
از آنجایی که تعداد نمونه‌های دو کلاس بافت لوم و سیلت کم بود، عملکرد مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی، به صورت جداگانه،

جدول ۲- گروه‌های بافتی، درصد اجزای سه‌گانه‌ی بافت و درصد کربنات کلسیم در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

گروه بافت	تعداد نمونه	کلاس بافت	درصد کربنات کلسیم		
			حدداقل	میانگین	حداکثر
سیک بافت	۷	SL	۵	۱۱	۲۱
	۲۰	SiL	۱۸	۳۷	۷۰
	۱	Si	-	۳۲	-
میان بافت	۳	L	۴۲	۴۸	۵۳
	۱۰	SiCL	۲۵	۳۰	۳۵
سنگین بافت	۹	SiC	۲۲	۲۷	۳۱

درصد‌های کربنات کلسیم و اجزای سه‌گانه‌ی بافت به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شده‌اند.

SL: Sandy loam, LS: Loamy sand, SiL: Silty loam, Si: Silty, L: Loamy, SiCL: Silty clay Loam, CL: Clay loam, SiC: Silty clay, SC: Sandy clay.

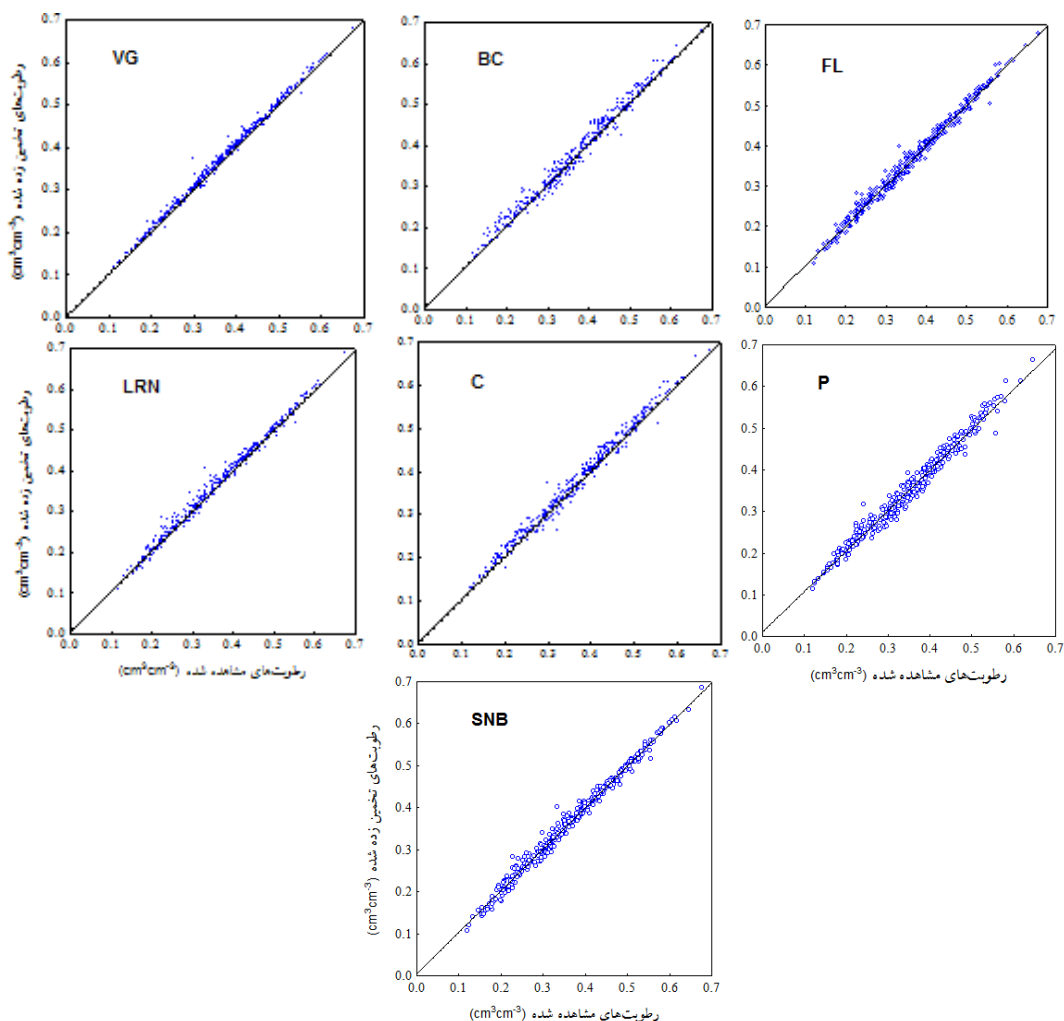


شکل ۲- مقایسه‌ی برازش مدل‌های منحنی رطوبتی برای SL، SiL، SiC و SiCL. نمودارهای سمت راست شامل سه مدل P= توانی بروس- لاکسمور (---)، FL= فارل-لارسون (—)، و SNB= سایمونز (—) و نمودارهای سمت چپ شامل چهار مدل C= کمبل (—)، VG= ون گنوتخن (—)، LRN= لیباردی (.....)، و BC= بروکس- کوری (—) هستند.

برای این مکش برآورد می‌کنند که چون میزان برآوردی مدل بروکس-کوری نسبت به دو مدل دیگر بیشتر بود، ضعیف‌ترین برازش در همه‌ی کلاس‌های بافت متعلق به این مدل بود. به عبارت دیگر، این مدل قادر به تخمین دقیق رطوبت در نزدیکی نقطه‌ی اشباع در اکثر کلاس‌های بافت و به ویژه کلاس‌های ریز بافت با مقادیر λ کوچک نبود که مطابق با نتایج گیمنز و همکاران (۱۷) و هوانگ و پاور (۲۰) بود. این رفتار توسط پراکنش نقاط رطوبتی تخمین زده شده با این مدل با مقادیر مشاهده‌ای در اطراف خط ۱:۱ (شکل ۳) نیز تصدیق می‌شود.

عملکرد مدل ون‌گنوختن به ویژه در منطقه‌ی نزدیک به اشباع از مدل بروکس-کوری بهتر بود. این نتیجه با نتایج آسولین و همکاران (۱۰) و مانیام و همکاران (۲۴) مطابقت دارد. اما بر خلاف یافته‌های مانیام و همکاران (۲۳) که نتیجه گرفته بودند مدل ون‌گنوختن در ناحیه‌ی خشک منحنی رطوبتی بیش برآوردی دارد، مدل ون‌گنوختن در این ناحیه از منحنی رطوبتی نمونه‌های خاک مورد مطالعه نیز دقت خوبی نشان داد.

رفتار سه مدل بروکس-کوری، کمبل و فارل و لارسون نیز شبیه به یکدیگر بود. این سه مدل میزان رطوبت اشباع را تا نقطه‌ی ورود هوا ثابت در نظر می‌گیرند. هر کدام از این سه مدل مقادیر متفاوتی



شکل ۳- پراکنش نقاط رطوبتی تخمینی در اطراف خط ۱:۱ توسط مدل‌های مختلف. FL = مدل فارل-لارسون، BC = مدل بروکس-کوری، VG = مدل ون‌گنوختن، P = مدل توانی بروس-لاکسمور، C = مدل کمبل، LRN = مدل لیباردی و همکاران و SNB = مدل سایمونز و همکاران.

مدل بروکس-کوری با نزدیک شدن به رطوبت اشباع رطوبت را بیشتر از حد واقعی تخمین می‌زند.

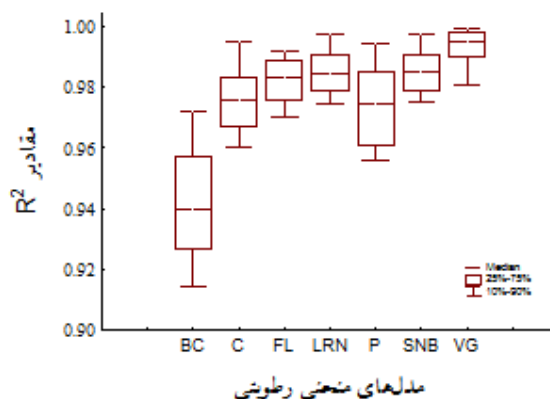
در جدول ۳ ضرایب خط رگرسیون و ضرایب تعیین (R^2) خط رگرسیون بین رطوبت‌های مشاهده شده و رطوبت‌های پیش‌بینی شده‌ی توسط هر مدل آورده شده است. ضرایب شیب و عرض از مبدا خط‌های رگرسیون هر مدل به ترتیب با صفر و یک اختلاف معنی‌داری ندارند ($P < 0.05$) پس تمامی مدل‌ها در مجموع عملکرد قابل قبولی داشتند اگرچه با توجه به شکل ۳ و جدول ۳ مشخص می‌شود که مدل‌های ون گنوختن (۳۳) و فارل-لارسون (۱۵) در مجموع بهترین دقت پیش‌بینی را در نمونه‌های خاک مورد مطالعه دارند.

مدل توانی نیز میزان رطوبت نزدیک نقطه‌ی اشباع را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زد با این تفاوت که خطای مدل توانی بروس-لاکسمور کمتر و برازش آن در همه‌ی کلاس‌های بافت بهتر از مدل بروکس-کوری بود. در مجموع برازش مدل کمبل در همه‌ی کلاس‌های بافت از مدل بروکس-کوری بهتر بود ولی در مقایسه با مدل توانی بروس-لاکسمور تنها در بعضی از کلاس‌های بافت برازش بهتری داشت.

در شکل ۳، نمودارهای ۱:۱ رابطه‌ی بین رطوبت‌های مشاهده شده با رطوبت‌های پیش‌بینی شده‌ی توسط مدل‌ها در تمام نمونه‌ها را نشان می‌دهند. نقاط پرت این نمودارها نشان دهنده‌ی خطاهای سیستماتیک و تصادفی آزمایشگاهی در تعیین منحنی رطوبتی هستند (۱۹). در بین مدل‌ها فارل-لارسون و ون گنوختن بیشترین دقت را در تخمین رطوبت داشتند. چهار مدل دیگر خطای بیشتری دارند و فقط

جدول ۳- ضرایب خط و ضریب تعیین رگرسیون بین رطوبت‌های مشاهده شده و رطوبت‌های پیش‌بینی شده توسط هر مدل

R^2	عرض از مبدا		شیب		نام مدل
	خطای معیار	میانگین	خطای معیار	میانگین	
۰/۹۹۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۹۹۷	ون گنوختن (۳۴)
۰/۹۹۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۹۹۰	فارل-لارسون (۱۵)
۰/۹۹۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۹۸۸	سایمونز و همکاران (۳۱)
۰/۹۹۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۹۸۶	لیباردی و همکاران (۲۲)
۰/۹۹۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۹۹۴	کمبل (۱۳)
۰/۹۸۹	۰/۰۰۳	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۹۷۱	توانی بروس-لاکسمور (۱۲)
۰/۹۸۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۹۹۷	بروکس-کوری (۱۱)



شکل ۴- نمودارهای جعبه‌ای ضریب R^2 مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی برای کلیه‌ی خاک‌های مورد مطالعه. BC = مدل بروکس-کوری، P = مدل توانی بروس-لاکسمور، FL = مدل فارل-لارسون، LRN = مدل لیباردی و همکاران، C = مدل کمبل، SNB = مدل سایمونز و همکاران و VG = مدل ون گنوختن

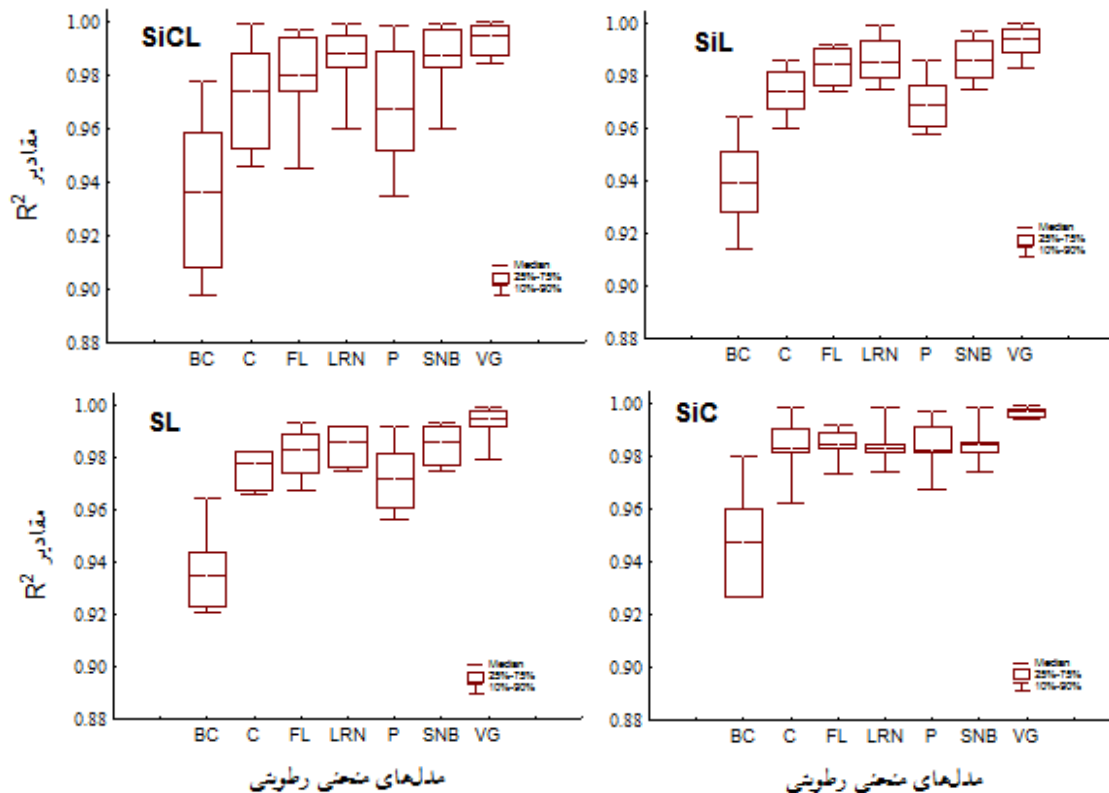
بهرتر، مدل VG بهترین عملکرد را داشت و عملکرد سه مدل دیگر مشابه با یکدیگر بود. از بین سه مدل با عملکرد ضعیف‌تر مدل BC ضعیف‌ترین عملکرد را داشت (بایستی توجه داشت که حتی در عملکرد ضعیف‌ترین R^2 بیشتر از ۹۰ درصد بود) و عملکرد دو مدل دیگر مشابه با یکدیگر بود.

ضرایب تعیین مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی در هر کلاس بافت نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج چهار کلاس بافت به صورت نمودارهای جعبه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است.

در همه‌ی کلاس‌های بافت، دو مدل ون‌گنوختن و بروکس-کوری به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. در کلاس بافت رسی‌سیلتی (SiC)، پراکنش R^2 ها کمترین و به غیر از مدل بروکس-کوری، میانه‌ی R^2 همه‌ی مدل‌ها بیشتر از ۰/۹۸ بود.

تعیین برترین مدل منحنی رطوبتی بر اساس معیارهای آماری

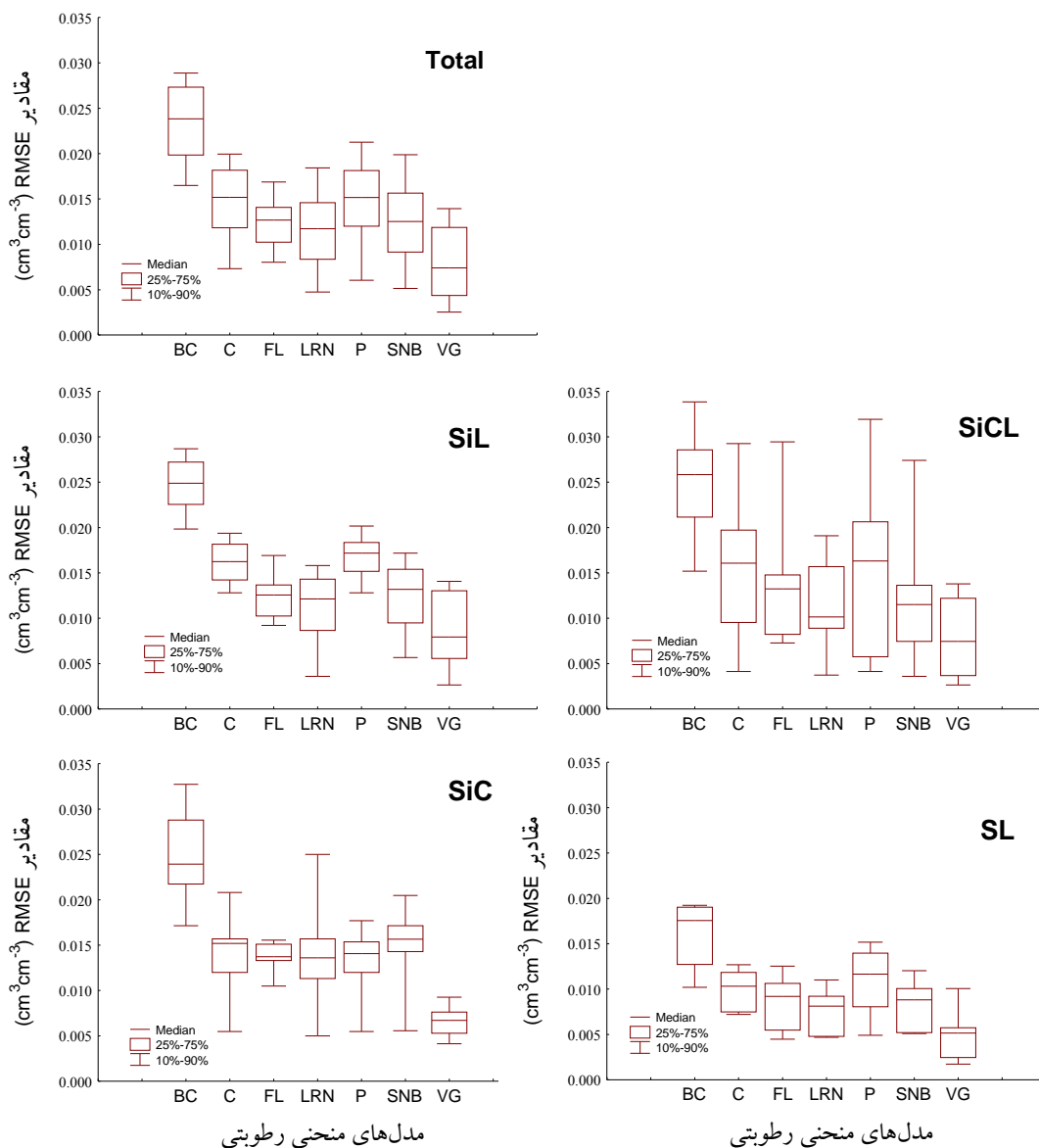
برای تعیین بهترین مدل منحنی رطوبتی از دو معیار آماری R^2 و $RMSE$ استفاده شد (۲۶). از برازش مدل‌های مختلف به کلیه‌ی نمونه‌های خاک مورد مطالعه، مقادیر R^2 بین ۰/۹۰ تا نزدیک ۱/۰۰ حاصل شد. در شکل ۴ نمودارهای جعبه‌ای R^2 مدل‌ها بر اساس میانه، چارک اول و سوم و ده درصد حداقل و حداکثر داده شده است. از آنجایی که میانه‌ی عملکرد همه‌ی مدل‌ها از ۰/۹۴ به بالا است، عملکرد همه‌ی این مدل‌ها در خاک‌های مورد مطالعه خوب است. بیشترین R^2 ها به چهار مدل ون‌گنوختن (VG)، لیباردی و همکاران (LRN)، سایمونز و همکاران (SNB) و فارل-لارسون (FL) و کمترین R^2 ها به سه مدل بروکس-کوری (BC)، توانی بروس-لاکسمور (P) و کمبل (C) تعلق داشتند. از بین چهار مدل با عملکرد



شکل ۵- نمودارهای جعبه‌ای ضریب R^2 مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی برای چهار کلاس بافت SiCL، SiL، SiC و SL. BC = مدل بروکس-کوری، P = مدل توانی بروس-لاکسمور، FL = مدل فارل-لارسون، LRN = مدل لیباردی و همکاران، C = مدل کمبل، SNB = مدل سایمونز و همکاران و VG = مدل ون‌گنوختن.

برای محاسبه‌ی خطای پیش‌بینی رطوبت توسط مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی از معیار $RMSE$ استفاده شد (۱۴). در شکل ۶ نمودارهای جعبه‌ای $RMSE$ برای مدل‌های منحنی رطوبتی چهار کلاس بافت مختلف و نیز کل نمونه‌ها نشان داده شده است.

در مقابل، R^2 های مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی در کلاس بافت لومرسی‌سیلتی (SiCL) بیشترین پراکنش را داشتند. نحوه‌ی تغییرات R^2 های مدل‌های منحنی رطوبتی در دو کلاس بافت لومسیلتی (SiL) و لوم‌شنی (SL) نیز مشابه با یکدیگر بود.



شکل ۶- نمودارهای جعبه‌ای $RMSE$ در مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی برای کل نمونه‌های خاک و چهار کلاس بافت SiL، SiCL، SiC و SL. BC = مدل بروکس-کوری، P = مدل توانی بروس - لاکسمور، FL = مدل فارل-لارسون، LRN = مدل لیباردی و همکاران، C = مدل کمبل، SNB = مدل سایمونز و همکاران و VG = مدل ون گنوختن

با توجه به معیارهای R^2 ، $RMSE$ و اطلاعات حاصل از خطوط ۱:۱ عملکرد هفت مدل در خاک‌های لردگان قابل قبول تا خیلی خوب است. با این حال، در مجموع مدل ون گنوختن (۳۳) به عنوان بهترین و مدل بروکس-کوری به عنوان ضعیف‌ترین مدل برگزیده شدند. هر چند R^2 ضعیف‌ترین مدل بروکس-کوری همیشه بیشتر از ۰/۹۰ و $RMSE$ آن کمتر از ۰/۰۳۶ بود. با توجه به عملکرد مدل‌ها، برای خاک‌های دشت لردگان مدل منحنی رطوبتی ون گنوختن (۳۳) توصیه می‌شود. ضرایب این مدل برای کلاس‌های بافتی خاک‌های دشت لردگان در جدول ۴ داده شده است.

جدول ۴- ضرایب مدل ون گنوختن (۳۳) برای خاک‌های دشت لردگان برای کاربردهای عملی

ضرایب مدل‌های ون گنوختن (۳۳)				کلاس بافت
m	α	θ_r	n	
۱/۱	۰/۰۷	۰/۰۶	۱/۶	SiL
۲/۱	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۷	SiC
۲/۴	۰/۰۴	۰/۱۴	۱/۱	SiCL
۲/۴	۰/۰۲	۰/۱۰	۱/۱	SL
۱/۵	۰/۰۷	۰/۱۰	۱/۳	میانگین کل

هم‌چنین با توجه به کیفیت برازش مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی در چهار کلاس بافت لوم شنی (SL)، لوم سیلتی (SiL)، لوم رسی سیلتی (SiCL) و رسی سیلتی (SiC) می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد چهار مدل سایمونز و همکاران (۳۰)، ون گنوختن (۳۳)، لیباردی و همکاران (۲۳) و فارل-لارسون (۱۵) خوب و مشابه با یکدیگر بود.

در کل نمونه‌های خاک، مدل ون گنوختن دارای کمترین $RMSE$ (از 0.001 تا 0.021) بود. بعد از مدل ون گنوختن به ترتیب $RMSE$ مدل‌های لیباردی و همکاران (از 0.003 تا 0.036)، سایمونز و همکاران (از 0.003 تا 0.039)، فارل-لارسون (از 0.003 تا 0.004)، توانی بروس-لاکسمور (از 0.004 تا 0.032)، کمبل (از 0.004 تا 0.029) و در نهایت بروکس-کوری (از 0.009 تا 0.036) افزایش یافتند. با افزایش $RMSE$ ، دقت مدل‌های فوق در تخمین رطوبت خاک‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد. مدل‌های ون گنوختن (با کمترین میانه $RMSE$) و بروکس-کوری (با بیشترین میانه $RMSE$) به عنوان بهترین و ضعیف‌ترین مدل برگزیده شدند. در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، خطای پیش‌بینی رطوبت در مدل ون گنوختن به طور متوسط کمتر از ۱ درصد و در مدل بروکس-کوری به طور متوسط در حدود ۲ درصد است. مدل‌های دیگر در پیش‌بینی رطوبت ۱/۵ درصد خطا دارند بنابراین همه‌ی مدل‌های مورد مطالعه خطای نسبتاً کمی در برآورد رطوبت نشان می‌دهند.

تغییرات پیش‌بینی رطوبت در مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی در کلاس بافت لوم‌شنی (SL) نسبت به سه کلاس بافت دیگر خیلی کمتر است (شکل ۵). این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که عملکرد همه‌ی مدل‌های منحنی رطوبتی در این کلاس بافت بهتر بوده است. در مقابل به نظر می‌رسد که تغییرات پیش‌بینی رطوبت توسط مدل‌های منحنی رطوبتی در کلاس بافت لوم‌رسی سیلتی (SiCL) بیشتر شده است.

نتیجه‌گیری

منابع

- ۱- ایول پور ب. ۱۳۷۷. تخمین منحنی مشخصه رطوبتی آب خاک و ضرایب هیدرولیکی خاک از روی دانه‌بندی. مجله علوم کشاورزی ایران. ۲۹: ۱۹۵-۲۰۵.
- ۲- افراسیاب پ. ۱۳۸۰. تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل کمبل در منطقه ورامین. مجله پژوهش و سازندگی. ۵۳: ۶۱-۵۸.
- ۳- ترابی فارسانی ن. و قهرمان ب. ۱۳۸۶. مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک در ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱: ۴۵-۵۷.
- ۴- رضایی ع، نیشابوری م. و جعفرزاده ع. ۱۳۸۰. ارزیابی مدل کمبل برای تعیین منحنی خصوصیات آب خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳: ۵۴۱-۵۵۰.
- ۵- فرخیان فیروزی ا. و همایی م. ۱۳۸۴. ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی خاک‌های گچی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۶: ۱۳۰-۱۴۲.
- ۶- قنبریان علویجه ب، لیاقت ع، شرفاء م. و مقیمی عراقی س. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل فراکتالی پرفکت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱: ۱۹-۷.

- ۷- قنبریان علویجه ب.، لیاقت ع.، شرفاء م. و مقیمی عراقی س. ۱۳۸۷. پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۹: ۸۰-۶۳.
- ۸- کشکولی ح.ع. و زینال‌زاده ک. ۱۳۸۰. مقایسه قابلیت برآزش برخی مدل‌های رطوبتی و کاربرد آنها در تخمین پارامترهای هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجله علوم خاک و آب. ۱۵(۲): ۲۸۹-۲۷۳.
- ۹- معماریان فرد م. ۱۳۸۰. تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی در سه دشت اصلی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد خاک‌شناسی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۱۱۲ صفحه.
- 10- Assouline S., Tessier D., and Bruand A. 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resour. Res.*, 34: 223-231.
- 11- Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. *Hydrol.*, 3:27.
- 12- Bruce R.R., and Luxmoore R.J. 1986. Water retention: field methods. *Method of soil analysis. Part 1 physical and mineralogical method. 2nd Ed.* A. Klute, ASA, Inc. SSSA, Inc. Medison, Wisconsin, 663-686.
- 13- Campbell G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, 117: 311-314.
- 14- Durando-Neto D., Nielsen D.R., Hopmnas J.W., Reichardt K., and Santos Bacchi O.O. 2001. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 3.00). *Scientia Agricola.*, ISSN 0103-9016.
- 15- Farrel D.A., and Larson W.E. 1972. Modeling the pore structure of porous media. *Water Resour. Res.*, 8: 699-706.
- 16- Gaurdner W.R. 1958. Some steady-state solution of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85: 228-232.
- 17- Gimenz D., Rawls W.J., Pachepsky Y., and Watt J.P.C. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Sci.*, 166: 79-88.
- 18- Hwang S.I., and Choi S.E. 2005. Use of a lognormal distribution model for estimating soil water retention curves from particle-size distribution data. *J. Hydrol.*, 1-10.
- 19- Hwang S.I., and Choi S.E. 2003. Lognormal distribution models for estimating soil water retention curves for sandy soils. *Soil Sci.*, 168: 156-166.
- 20- Hwang S.I., and Powers S.E. 2003a. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1103-1112.
- 21- Hutson J.L., and Cass A. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *Soil Sci.*, 38: 105-113.
- 22- Kern J.S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 1134-1141.
- 23- Libardi P.L., Reichardet K., and Nascimento Filho V.F. 1979. Analiso da redistribuicao de agua visando a conductividade hidraulica do solo. *Energia Nuclear a Agriculture*, 1:108.
- 24- Manyame C., Morgan C.L., Heilman J.L., Fatondji D., Gerad B., and Payne W.A. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141:407-415.
- 25- Mermoud A., and Xu D. 2006. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. *Soil and Tillage Research*, 87: 89-100.
- 26- Nimmo J.R. 1991. Comment on the treatment of a residual water content in a "A consistent set of parametric model for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface by L. Luckner et al., ". *Water Resour. Res.*, 27: 661-662.
- 27- Rogowski A.S. 1971. Watershed physics: model of soil moisture characteristics. *Water Resour. Res.*, 7: 1575-1582.
- 28- Ross P.J., Williams J., and Bristow K.L. 1991. Equations for extending water retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 923-927.
- 29- Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., and Papendick R.I. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1031-1036.
- 30- Simmons C.S., Nielson D.R., and Bigger J.W. 1979. Scaling of field-measured soil water properties. *Hilgardia*, 47: 77-173.
- 31- Statsoft, Inc. 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- 32- Tyler S.W., and Wheatcraft S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and Limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 362-369.
- 33- 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.
- 34- Word Reference Base for Soil Resources (first update). 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

The Fitting Quality of Several Water Retention Models in Soil Samples from Lordegan, Charmahal-va-Bakhtiari

E. Nabizadeh^{1*} - H. Beigi Harchegani²

Received: 6-10-2010

Accepted: 20-2-2011

Abstract

Water retention curve (WRC) is a fundamental property of soil. It is used to evaluate available water, permeability, drainage and movement of solutes. Despite numerous studies on WRC of soils abroad, no local study has been carried out on Charmahal-va-Bakhtiari soils. The objective of this study was to compare the quality of fitting of several WRC models to Lordegan soils and to select the appropriate models. The studied models were: Brooks-Corey, van Genuchten, Farrel-Larson, Libardi et al., Simmons et al., Bruce-Luxmoore and Campbell. Fifty soil samples were collected from across Lordegan plain and their texture were determined characterized for texture. Water retention data were obtained using hanging water column and pressure plate apparatus. Models were fitted using SWRC 3.0 software. R-square (R^2) and RMSE were used for evaluating fitting quality. All models did well with R^2 ranging from 0.90 to 1.00 and RMSE from 0.001 to 0.036. However, in all samples and all textural classes, van Genuchten model fitted best. Brooks-Corey model was the weakest although its R^2 was always greater than 0.90 and its maximum RMSE was $0.036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Therefore, van Genuchten model is recommended for soils of Lordegan plain.

Keywords: Soil water retention curve, Van-Genuchten, Brooks-Corey, Fitting quality

1,2- Farmer MSc Student and Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shahrekord University

(* - Corresponding Author Email: elham.nabizadeh@gmail.com)