نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد چهارم، شماره چهارم، ۱۳۹۳
http://ejsms.gau.ac.ir

تأثیر گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار کربن آلی و رس آن‌ها بر کارآیی توابع انتقالی سلسله مراتبی گنجایش تبادل کاتیونی خاک

نوش‌آفرین حسینی‌عربلو[۱]، *حبیب خداوردی‌لو[۲]، شجاع قربانی‌دشتکی[۳] و حمیدرضا ممتاز[۴]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران، [۲]دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، [۳]دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، [۴]استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۱

چکیده

گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های آن در پایش و مدیریت کیفیت خاک در راستای نیل به تولید پایدار است. گرچه CEC را می‌توان به روش مستقیم اندازه‌گیری نمود، این اندازه‌گیری به‌ویژه در خاک‌های اریدی‌سول به‌دلیل مقادیر بالای کلسیم و گچ، دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است. یکی از روش‌های جایگزین اندازه‌گیری مستقیم، استفاده از توابع انتقالی خاک (PTF) است که در آن CEC خاک با استفاده از اطلاعات موجود خاک برآورد می‌گردد. هدف از این پژوهش، ایجاد PTF هایی سلسله مراتبی برای برآورد CEC و تأثیر گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار رس و کربن آلی بر کارآیی این توابع بود. مجموعه‌ای با ۱۱۴۱ داده به‌عنوان سری آموزشی برای ایجاد و ارزیابی دقت توابع استفاده شد. مجموعه داده مستقل دیگری با ۲۳۲ داده نیز به‌عنوان سری آزمون و برای ارزیابی اعتبار توابع ایجاد شده به‌کار رفت. نتایج نشان داد، گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار رس و کربن آلی به‌طور عموم موجب کاهش ضریب تغییرات مقادیر رس، کربن آلی و CEC گردید. به‌طورکلی با گروه‌بندی خاک‌ها، همبستگی رس و کربن آلی با CEC کاهش یافت. در خاک‌هایی با مقادیر کربن آلی کم‌تر از ۰/۵ درصد تنها با استفاده از درصد رس به‌عنوان ورودی، CEC با دقت قابل‌قبولی برآورد گردید. به‌طورکلی، گروه‌بندی خاک‌ها موجب افزایش دقت توابع انتقالی گردید ولی در بیش‌تر موارد از اعتبار توابع کاسته شد. با این‌حال گروه‌بندی براساس مقدار رس به‌جز در

* مسئول مکاتبه: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

خاک‌هایی با مقدار رس ≤ ۳۵٪، تأثیر بیش‌تری در بهبود دقت و اعتبار توابع داشت. نتایج همچنین نشان داد، رس (به‌جز در خاک‌هایی با مقدار رس ≤ ۳۵ درصد) تأثیرگذارترین عامل در برآورد CEC خاک‌های مورد مطالعه بود، به‌طوری‌که با وارد نمودن متغیرهای دیگر بهبود چشم‌گیری در دقت و اعتبار توابع به‌دست نیامد.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی خاک، گنجایش تبادل کاتیونی، ویژگی‌های زودیافت خاک

مقدمه

گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)[1] از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک بوده و شاخصی مناسب برای ارزیابی کیفیت، بهره‌وری خاک و مدیریت آلودگی می‌باشد. CEC بر بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند گنجایش بافری خاک و حساسیت آن در مقابل کاهش pH نیز تأثیر می‌نهد. به‌گونه‌ای که برای کاهش pH خاک‌هایی با CEC بیش‌تر باید مواد اصلاحی بیش‌تری مصرف گردد (مک‌فی، ۱۹۸۳). CEC به‌عنوان یک ورودی در بسیاری از مدل‌های کامپیوتری خاک و محیط زیست که برای نمونه، هدف آن‌ها تخمین حاصلخیزی خاک، قابلیت جذب عناصر و فرسایش خاک است، استفاده می‌گردد (کلر و همکاران، ۲۰۰۱؛ مانریکو و همکاران، ۱۹۹۱).

مقدار CEC بسته به مقدار و نوع رس، ماده آلی و شرایط خاک متغیر است. به‌طور عموم CEC خاک براساس رس و کربن آلی خاک برآورد می‌شود و شکل کلی برآورد CEC به‌صورت رابطه زیر می‌باشد (مک‌دونالد، ۱۹۹۸):

$$CEC = a + (b\ OC) + (c\ Clay) \quad (1)$$

که در آن، OC و Clay به‌ترتیب درصد ماده آلی و رس و a، b و c ضرایب رگرسیونی هستند.

مواد آلی خاک به‌دلیل داشتن سطح ویژه و بار الکتریکی زیاد، نقشی مهم در مقدار CEC خاک دارند. برای نمونه خاک‌های شامل رس گروه اسمکتایت نسبت به خاک‌های دارای رس گروه کائولینایت، CEC بیش‌تری دارند (اسپارکس، ۱۹۹۵). در ضمن با افزایش درجه هوموسی شدن مواد آلی، مقدار گنجایش تبادل کاتیونی آن‌ها افزایش می‌یابد (میرخانی و همکاران، ۲۰۰۵؛ سیبولد و

1- Cation Exchange Capacity

همکاران، ۲۰۰۵). CEC رس‌ها به‌علت تفاوت در منشأ بار الکتریکی منفی آن‌ها بسیار متغیر بوده و مقدار آن بسته به نوع بار (دائم یا وابسته به pH) متفاوت است (میلر، ۱۹۷۰؛ اسپارکس، ۱۹۹۵). تمامی CEC هوموس و رس‌های اکسیدی و دست‌کم بخشی از CEC رس‌های سیلیکاتی لایه‌ای تابع pH محیط است (میلر، ۱۹۷۰؛ سیبولد و همکاران، ۲۰۰۵).

روش‌های مختلفی برای تعیین CEC خاک وجود دارد، که به‌طور عموم پایه عملی یکسانی دارند. رایج‌ترین روش اندازه‌گیری CEC در ایران به روش باور است (باور و همکاران، ۱۹۵۲) که شامل شست و شوی خاک با استات سدیم، خارج کردن نمک‌های محلول با الکل اتیلیک و سپس اندازه‌گیری سدیم به‌دست آمده از شست و شو با استات آمونیوم است. با این‌حال، تمامی این روش‌ها دشوار و زمان‌بر و به‌طور عموم پرهزینه هستند (راگوسکی و ولف، ۱۹۹٤؛ فوس و الیس، ۱۹۹۷؛ کلر و همکاران، ۲۰۰۱). از این‌رو، با این‌که CEC شاخصی مهم در ارزیابی خاک و تعیین استعداد اراضی است، به‌دلیل مشکلات اندازه‌گیری، در بسیاری از موارد نادیده گرفته می‌شود (آرنود و سپتون، ۱۹۷۲). از این‌رو، در بسیاری از بانک‌های اطلاعاتی داده‌های اندازه‌گیری شده بافت و درصد کربن آلی به مراتب بیش‌تر از اندازه‌گیری‌های CEC است. افزون بر این، اندازه‌گیری CEC در خاک‌های مناطق خشک ایران یا رده اریدی‌سول به‌دلیل وجود مقادیر زیاد کربنات کلسیم (کارپنا و همکاران، ۱۹۷۲) و گچ (فرناندو و همکاران، ۱۹۷۷) دشوارتر، هزینه‌برتر و وقت‌گیرتر است.

بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد CEC مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های جایگزین اندازه‌گیری مستقیم CEC، برآورد آن با توابع انتقالی خاک (PTFs)[1] می‌باشد. توابع انتقالی خاک، توابعی هستند که برای نمونه با روش‌های رگرسیونی مشخصات و ویژگی‌های مختلف پایه‌ای خاک را با سایر مشخصات و ویژگی‌های دیریافت خاک ارتباط می‌دهند (بوما، ۱۹۸۹). فرض اساسی در بیش‌تر مدل‌های برآوردکننده CEC وجود رابطه‌ای خطی بین CEC خاک با درصد مواد آلی و رس خاک می‌باشد (بورسما و همکاران، ۱۹۸٦؛ مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۰۲؛ امینی و همکاران، ۲۰۰۵).

دریک و موتو (۱۹۸۲) و آرنود و سپتون (۱۹۷۲) نشان دادند که اگر از مقدار CEC خاک اطلاعاتی در دست نباشد، تجزیه رگرسیون چندمتغیره از روی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، کامیاب‌ترین روش در برآورد CEC است. توابع انتقالی به‌طور موفقیت‌آمیزی در برآورد مقدار محصول (هاسکت و

1- Pedotransfer Functions

همکاران، ١٩٩٦)، پیش‌بینی هدررفت مواد شیمیایی از منطقه ریشه به‌سمت آب‌های زیرزمینی (کارسل و همکاران، ١٩٩١)، تخمین ویژگی‌های شیمیایی مانند CEC (سیبولد و همکاران، ٢٠٠٥)، جذب و واجذب فلزات توسط خاک (خداوردیلو و صمدی، ٢٠١١)، تخمین ویژگی‌های فیزیکوهیدرولیکی مانند هدایت هیدرولیکی خاک (ون‌آلفن و همکاران، ٢٠٠١)، منحنی رطوبتی خاک (قربانی‌دشتکی و همکاران، ٢٠١٠؛ خداوردیلو و همکاران، ٢٠١١) و جرم ویژه ظاهری (کلر و همکاران، ٢٠٠١) و برآورد ویژگی‌های بیولوژیکی خاک مانند معدنی شدن ازت (راسیاح، ١٩٩٥) به‌کار رفته است.

توابع انتقالی گوناگونی برای برآورد CEC خاک ایجاد شده است (مانریکو و همکاران، ١٩٩١؛ بل و وان‌کولن، ١٩٩٥؛ مک‌دونالد، ١٩٩٨؛ وستن و همکاران، ٢٠٠١). در بیش‌تر این مدل‌ها، CEC تابعی خطی از مواد آلی و مقدار رس می‌باشد. مک‌دونالد (١٩٩٨) دو معادله برای خاک‌های کبک و آلبرتا در کانادا با استفاده از متغیرهای ماده آلی خاک و رس ارایه داده است. سیبولد و همکاران (٢٠٠٥) برای ایجاد توابع برآوردکننده CEC از متغیرهای مستقل مقدار رس، سیلت، کربن آلی و pH خاک استفاده کردند. بل و وان‌کولن (١٩٩٥) در چهار منطقه از مکزیک توابعی ایجاد کردند که بیش از ٩٦ درصد از تغییرات CEC خاک را به‌وسیله مقدار رس، مواد آلی و pH خاک تبیین می‌نمود. هورن و همکاران (٢٠٠٥) مقدار رس و کربن آلی، پارفیت و همکاران (١٩٩٥) مقدار کربن آلی، رس و نوع کانی‌های رسی، نوربخش و همکاران (٢٠٠٣) درصد ماده آلی، درصد اندازه ذرات و pH و میرخانی و همکاران (٢٠٠٥) مقدار رس، سیلت و کربن آلی را در برآورد مقدار CEC مؤثر دانسته‌اند. همچنین براساس نتایج معلمی و دوات‌گر (٢٠١١) CEC بیش‌ترین همبستگی را با متغیر کربن آلی دارد که می‌توان اثر کربن آلی بر CEC را به سطح ویژه و گروه‌های عاملی زیاد آن نسبت داد.

یکی از روش‌های که می‌تواند باعث افزایش دقت PTF ها گردد، گروه‌بندی خاک‌ها است. این کار موجب افزایش همگنی و یکنواختی ویژگی‌ها و همچنین کاهش نسبی اختلاط اثرات این ویژگی‌ها و یا کاهش در تغییرات ویژگی‌های خاک مانند مینرالوژی، ترکیبات مواد آلی و نوع و توسعه ساختمان پس از انجام تفکیک در بین گروه‌ها می‌شود (مهاجر و همکاران، ٢٠٠٩). پاچپسکی و راولس (١٩٩٩) نشان دادند که وقتی خاک‌ها بر پایه مشابهت در منشأ یا خواص گروه‌بندی گردند، اعتبار مدل‌های پیش‌بینی‌کننده بهبود می‌یابد. سیبولد و همکاران (٢٠٠٥) برای افزایش دقت برآورد CEC، خاک‌های مورد مطالعه را به گروه‌های همگون‌تر بر مبنای مقدار کربن آلی، pH، ترکیب کانی‌شناسی و رده خاک‌ها گروه‌بندی نمودند.

PTF هایی که برای برآورد CEC ایجاد شده‌اند، به‌ویژه در خاک‌های ایران، بر پایه شماری انـدک از نمونه‌های خاک بنا شده‌اند. همچنین تأثیر گروه‌بندی خاک‌ها، مبنای گروه‌بندی و تعداد ورودی‌هـای مدل بر دقت و اعتبار توابع کم‌تر بررسی شده است. هدف از این پژوهش، استفاده از داده‌هایی به‌نسبت پرشمار (n=۱۱٤۱) برای ایجاد توابعی سلسله مراتبی برای برآورد CEC خاک‌های منـاطقی خـشک و نیمه‌خشک از ایران، تعیین مهم‌ترین متغیرهای مستقل در برآورد CEC خاک و بررسی اثر گـروه‌بنـدی خاک‌ها براساس مقدار رس و کربن آلی در افزایش کارآیی توابع انتقالی بود.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده: سری داده مورد استفاده در ایجاد و ارزیابی دقـت (n=۱۱٤۰) و سـری کـاملاً مستقل دیگری برای ارزیابی اعتبار (n=۲۳۲) توابع انتقالی از مرکز تحقیقات خاک و آب کرج و مرکز تحقیقات کشاورزی استان‌های آذربایجـان‌غربـی و شـرقی گـردآوری شـدند. ایـن داده‌هـا مربـوط بـه خاک‌های استان‌های تهران، قزوین، کردستان، آذربایجان‌غربـی و شـرقی، اردبیـل و خوزسـتان بودنـد. متغیرهای استفاده شده برای پیش‌بینی CEC شامل فراوانی نسبی اندازه ذرات، pH و کـربن آلـی بـود. برای همه داده‌ها ویژگی‌ها با روش‌هایی یکسان به‌دست آمده بودند کـه شـامل فراوانـی نـسبی انـدازه ذرات به روش هیدرومتری (جی و بودر، ۱۹۸٦)، CEC خاک بـه روش بـاور و همکـاران (۱۹۵۲) و مقدار کربن آلی خاک از روش والکلی- بلک اصلاح‌شده (نلـسون و سـامرز، ۱۹۸٦) و pH خـاک در عصاره گل اشباع (مک‌لین، ۱۹۸۲) می‌باشند.

پیش‌پردازش داده‌ها و ایجاد توابع انتقالی سلسله مراتبی: اطلاعات آماری مجموعـه داده‌هـای سـری آموزش و آزمون در جدول (۱- الف) آمده است. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab 14 بررسی شد، زیرا توابع رگرسیونی بر فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها استوارند (مک‌براتنی و همکـاران، ۲۰۰۲). به‌منظور بررسی اثر تفکیک خاک‌ها بر دقت و اعتبار توابع، یـک بـار تمـامی داده و یـک بـار سری‌های گروه‌بندی شده از داده‌ها براساس درصـد کـربن آلـی (۰/۵-۰، ۱-۰/۵، >۱) و درصـد رس (<۱۸، ۳۵-۱۸، >۳۵) برای ایجاد و ارزیابی توابـع بـه‌کـار رفتنـد. سـپس، بـرای گـزینش متغیرهـای برآوردکننده CEC ضریب همبستگی بین CEC و ویژگی‌های زودیافت به‌دست آمد. همچنـین، بـرای جلوگیری از هم‌راستایی خطی چندگانه[1]، ضریب همبستگی بین ویژگی‌های زودیافـت مـورد اسـتفاده

1- Multicollinearity

برای کل داده‌ها و نیز برای هر گروه ایجاد شده تعیین گردید. گفتنی است استفاده هم‌زمان از متغیرهای مستقلی که خود آن‌ها همبستگی بالایی با همدیگر دارند، موجب ایجاد هم‌راستایی خطی چندگانه می‌گردد (خداوردی‌لو و همکاران، ٢٠١١).

توابع انتقالی با استفاده از رگرسیون چندمتغیره گام به گام با بهترین زیرمجموعه[1] و با استفاده از نرم‌افزار Minitab 14 برای هر گروه از داده‌ها ایجاد شد. در صورت ایجاد بیش از یک تابع انتقالی برای هر گروه، تابعی ارجح‌تر پنداشته شد که اعتبار بیش‌تری داشته باشد (پاچپسکی و همکاران، ١٩٩٦).

ارزیابی دقت و اعتبار توابع انتقالی ایجاد شده: برای ارزیابی دقت و اعتبار توابع ایجاد شده از مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطا (ME) و شاخص همخوانی (d) بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شد. این معیارها به‌ترتیب از رابطه‌های زیر به‌دست آمدند (خداوردی‌لو و همکاران، ٢٠١١):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (٢)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{n} \qquad (٣)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|(P_i - \overline{O})\right| + \left|(O_i - \overline{O})\right|\right)^2} \right] \qquad (٤)$$

که در آن‌ها، P_i: مقادیر برآورده شده CEC، O_i: مقادیر اندازه‌گیری شده CEC توسط توابع انتقالی، $\overline{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n: تعداد کل مشاهده‌ها می‌باشد.

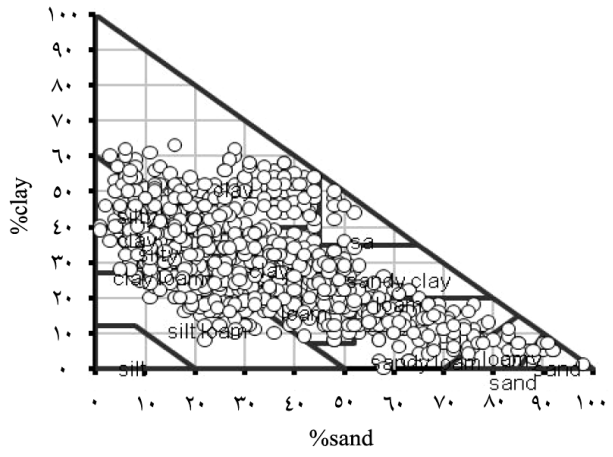
$RMSE$ خطای مطلق برآوردها را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی‌که ME مقدار کلی خطای نسبی و شدت بیش‌برآوردی (ME>٠) یا کم‌برآوردی (ME<٠) توابع را نشان می‌دهد. به‌دلیل ناکارآمدی‌های معمول ضریب تبیین (R^2) (خداوردی‌لو و همکاران، ٢٠١١) از شاخص همخوانی[2] (d) به‌جای آن

1- Best Subset Regression
2- Index of Agreement

استفاده شد. بر خلاف R^2 که شاخصی از همبستگی یا هم‌راستایی مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است، شاخص d بیانگر دقت برآوردهاست و نشان می‌دهد که برآوردها تا چه اندازه بی‌خطا هستند (خداوردی‌لو و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش، از بین توابع ایجاد شده برای هر گروه و کل داده‌ها، بهترین تابع به‌گونه‌ای انتخاب شد که نزدیک‌ترین مقدار $RMSE$ و ME به صفر و نزدیک‌ترین مقدار d به یک را داشته باشد.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی داده‌ها: با توجه به جدول (۱- الف)، گستره CEC و همچنین ویژگی‌های زودیافت مورد استفاده، تغییرات به‌نسبت بالایی دارند. بنابراین تغییرپذیری در هر گروه توسط این داده‌ها قابل تبیین است. در ضمن، پراکندگی هر ویژگی در داده‌های سری آزمون به‌نسبت در محدوده پراکندگی آن ویژگی در سری آموزش است، بنابراین استفاده از داده‌های سری آزمون برای ارزیابی اعتبار توابع ایجاد شده با سری آموزش منجر به برون‌یابی[1] نخواهد گردید. توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه به‌نسبت گسترده بوده و به‌طور عمده در کلاس‌های بافتی لوم رسی، لوم، رسی سیلتی و رسی قرار گرفته‌اند (شکل ۱).



شکل ۱- توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش.

1- Extrapolation

در جدول (١- ب و ١- ج) خلاصه آماری داده‌ها بعد از گروه‌بندی براساس مقدار رس و کربن آلی آورده شده است که در برخی از گروه‌ها مشاهده می‌شود که از گستره ویژگی‌ها کاسته شده است. به‌نظر می‌رسد که گروه‌بندی و تفکیک داده‌ها براساس شباهت‌ها، باعث کاهش تغییرات و در نتیجه بهبود نتایج شود. در گروه‌بندی براساس کربن آلی (جدول ١- ب) با افزایش مقدار کربن آلی، میانگین درصد رس خاک و نیز CEC افزایش یافته، ولی مقدار ضریب تغییرات کاهش می‌یابد. دلیل ارتباط مستقیم بین مقدار رس و ماده آلی خاک ایجاد کمپلکس بین این دو متغیر خاک است (اسپارکس، ١٩٩٥). این حالت در گروه‌بندی براساس مقدار رس خاک (جدول ١- ج) نیز قابل مشاهده است. روند تغییرات CV رس، کربن آلی، CEC و pH برای گروه‌های ایجاد شده به‌طور عموم، ولی نه همواره، با گروه‌بندی خاک‌ها کاهش یافت. ضریب تغییرات pH کم‌تر از ١٥ درصد است که براساس طبقه‌بندی ویلدینگ و درس (١٩٨٣) در گروه متغیرهایی با حداقل تغییرپذیری طبقه‌بندی می‌شود و برای دیگر متغیرها بالاتر از ٣٥ درصد است که براساس این طبقه‌بندی در گروه متغیرهای با حداکثر ضریب تغییرات طبقه‌بندی می‌شوند. بالا بودن ضریب تغییرات، نشان‌دهنده آن است که متغیرهای بالا بیش‌تر تحت‌تأثیر کاربری و عملیات مدیریت زراعی قرار گرفته‌اند. این تغییرات بزرگ در کربن آلی می‌تواند در اثر تفاوت در مقدار ونوع کودهای کاربردی و شیوه مدیریت بقایای زراعی در مناطق مورد مطالعه باشد. هرچه ضریب تغییرات یک ویژگی بیش‌تر باشد، یعنی پراکندگی بیش‌تری در مقدار آن ویژگی وجود دارد.

همبستگی بین متغیرها: جدول (٢- الف، ب و ج) ضرایب همبستگی خطی (پیرسون) CEC را با متغیرهای زودیافت خاک و ضرایب همبستگی متغیرهای زودیافت خاک را با یکدیگر در کل داده‌ها و گروه‌بندی‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (٢- الف) آمده است، همبستگی CEC با مقادیر رس، سیلت و کربن آلی در کل داده‌ها مثبت و معنی‌دار است ($P\leq$٠/٠٠١).

جدول ١- برخی آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌ها در داده‌های سری آموزش و اعتبار توابع.

گروه‌بندی	متغیر	سری آموزش$^{\$}$					سری آزمون اعتبار$^{\$}$				
		CEC	Clay	Silt	OC	pH	CEC	Clay	Silt	OC	pH
الف) پیش از گروه‌بندی خاک‌ها (کل داده‌ها)											
کل داده‌ها	حداکثر	٤٤/٥	٦٣	٧٠	١/٦٣	١٠/٣	٤٠/٣	٦١	٨٦	٣/٦٦	٨/٦
($n_{آموزش}$=١١٤١)	حداقل	٢/٧	٠	١	٠/٠٠	٦/٥	٥	٠	٥	٠/٠٣	٦/٧
($n_{اعتبار}$=٢٣٢)	میانگین	١٨/٢	٣٠	٣٨	٠/٦٤	٧/٩	٢٠/٠	٢٨	٣٧	٠/٨٧	٧/٨
	ضریب تغییرات	٤١/٥	٤٣	٣٧	٥٣/٧	٦/٠	٣٩/٦	٥١	٤٠	٧٩/٨	٤/١

ادامه جدول ۱-

گروه‌بندی	متغیر	سری آموزش[$]					سری آزمون اعتبار[$]				
		CEC	Clay	Silt	OC	pH	CEC	Clay	Silt	OC	pH
ب) پس از گروه‌بندی براساس کربن آلی											
کربن آلی≥۰/۵	حداکثر	٤٤/٥	٥٩	٦٦	۰/٥۰	۱۰/۳	۳٥/٦	٦۱	۷۲	۰/٥۰	۸/٤
($n_{آموزش}$=٤٤۸)	حداقل	۲/۷	۰	۱	۰/۰۰	٦/۷	۰/٥	۳	٥	۰/۰۳	٦/۷
($n_{اعتبار}$=۸۲)	میانگین	۱٥/۳	۲٤	۳٤	۰/۲۹	۸/۱	۱٦/۰	۲۳	۲۷	۰/۲٦	۷/۸
	ضریب تغییرات	٤۸/۲	٥۳	٤۰	٤٦/٦	٦/٥	٤٦/۹	٦٦	٥۲	٥٥/۰	۳/٦
کربن آلی=۱-۰/۵	حداکثر	٤۳/٥	٦۳	٦۷	۱/۰۰	۹/۹	٤۰/۳	٥۸	۷۸	۱/۰۰	۸/۲
($n_{آموزش}$=٥۲٤)	حداقل	۳/۷	٦	٤	۰/٥۱	٦/٥	٦/۸	۰	۱٥	۰/٥۱	٦/۷
($n_{اعتبار}$=۷۷)	میانگین	۱۹/۱	۳۳	٤۰	۰/۷٥	۷/۸	۲۰/٤	۳۰	۳۹	۰/۷٥	۷/۷
	ضریب تغییرات	۳٥/٦	۳٥	۳۲	۱۸/٥	٥/٥	۳۳/۹	٤٤	۳۰	۱۸/۱	٤/۲
کربن آلی>۱	حداکثر	٤۳/٥	٦۳	٦۹	۱/٦۳	۹/۹	۳۸/٥	٥۷	۸٦	۳/٦٦	۸/٦
($n_{آموزش}$=۱٦۳)	حداقل	۹/٤	۱۱	۲	۱/۰۱	۷/۰	۱۲/۱	۰	۲٦	۱/۰۲	٦/۷
($n_{اعتبار}$=۷۳)	میانگین	۲۲/۷	۳٦	۳۹	۱/۱۹	۷/۸	۲٤/۳	۳۱	٤۷	۱/٦٦	۷/۷
	ضریب تغییرات	۳۱/۸	۲۸	۳۷	۱۱/۸	٥/۱	۳۰/۳	٤۱	۲٤	۳۸/٦	٤/٥
ج) پس از گروه‌بندی براساس مقدار رس											
درصد رس<۱۸٪	حداکثر	۲۸/۰	۱۷	۷۰	۱/٤۲	۹/٤	۲٦/۲	۱۷	۸٦	۲/۱۰	۸/٥
($n_{آموزش}$=۲۰٤)	حداقل	۲/۷	۰	۱	۰/۰۲	٦/۷	٥/۰	۰	٥	۰/۰۳	٦/۷
($n_{اعتبار}$=٦۱)	میانگین	۱۱/۲	۱۱	۳۰	۰/۳۷	۸/۰	۱٤/۲	۱۱	۳٤	۰/٥۷	۷/۸
	ضریب تغییرات	٤۱/۰	۳٥	٥۱	۷٦/۷	٥/٦	٤۰/۱	٤٤	٦۰	۸۹/۹	٥/۰
درصد رس= ۳٥-۱۸٪	حداکثر	۳۷/۰	۳٤	٦۹	۱/٥۸	۱۰/۲	۳۳/٦	۳۳	٦٦	۳/٥۲	۸/٦
($n_{آموزش}$=٥۳٤)	حداقل	۲/۸	۱۸	۱۳	۰/۰۰	٦/٥	۷/۷	۱۸	۱۰	۰/۰۸	٦/۷
($n_{اعتبار}$=۱۰۳)	میانگین	۱۷/٦	۲۷	٤۲	۰/٦۳	۸/۰	۱۸/٤	۲٦	۳۸	۰/۹۱	۷/۸
	ضریب تغییرات	۳٤/٥	۱۸	۲۸	٤۸/۸	٥/۹	۳۰/۸	۱۸	۳۷	۷۳/۸	٤/۰
درصد رس≤۳٥٪	حداکثر	٤٤/٥	٦۳	٦۱	۱/٦۳	۱۰/۳	٤۰/۳	٦۱	٥۸	۳/٦٦	۸/۳
($n_{آموزش}$=٤۰۲)	حداقل	۳/٥	۳٥	۲	۰/۰۰	٦/۷	۱۲/٥	۳٥	۷	۰/۰۹	۷/۱
($n_{اعتبار}$=٦۸)	میانگین	۲۲/٤	٤٤	۳٦	۰/۷۷	۷/۹	۲۷/۹	٤٦	٤۰	۱/۰۷	۷/۷
	ضریب تغییرات	۳٤/۲	۱٥	۳۷	٤۲/٦	٦/٤	۲۳/٤	۱٥	۲۳	۷۲/۸	۳/٤

[$]: CEC (گنجایش تبادل کاتیونی) بر حسب $cmol_c kg^{-1}$ و Clay (رس)، Silt (سیلت) و OC (کربن آلی) بر حسب درصد هستند.

همبستگی مثبت CEC با رس و کربن آلی به‌دلیل مشارکت آن‌ها در ایجاد بارهای منفی و پدیده تبادل کاتیونی است که در توسط بسیاری از پژوهشگران به آن اشاره شده است (برای نمونه، مانریک و همکاران، ١٩٩١؛ بل و ونکولن، ١٩٩٥؛ امینی و همکاران، ٢٠٠٥؛ نوربخش و همکاران، ٢٠٠٣). میرخانی و همکاران (٢٠٠٥) در برآورد CEC خاک‌های لرستان، همبستگی بالایی میان رس، سیلت و کربن آلی با CEC به‌دست آوردند. کانی‌های موجود در بخش سیلت نیز سهم اندکی در CEC دارند. بارهای الکتریکی منفی خنثی نشده در سطح ذرات سیلت وجود دارند، اما به‌علت سطح ویژه کم آثار ناچیزی در CEC خاک‌ها ایجاد می‌کنند.

جدول ٢- ضرایب همبستگی بین متغیرهای زودیافت و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) خاک.

	متغیرها	رس	سیلت	کربن آلی	pH
الف) پیش از گروه‌بندی خاک‌ها (کل داده‌ها)					
کل داده‌ها (n=١١٤١)	سیلت	-٠/٠٢^{ns}			
	کربن آلی	٠/٣٩***	٠/١٩***		
	pH	-٠/٠٩***	-٠/٠٥^{ns}	-٠/٢١***	
	CEC	٠/٥٢***	٠/٢٤***	٠/٣٦***	-٠/٠١^{ns}
ب) پس از گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار کربن آلی					
کربن آلی ≤ ٠/٥ (n=٤٤٨)	سیلت	٠/٣٠***			
	کربن آلی	٠/٢٢***	٠/٢٣***		
	pH	٠/١٦***	-٠/٠٩^{ns}	-٠/٠٨^{ns}	
	CEC	٠/٦٤***	٠/٢٤***	٠/٠٣^{ns}	٠/١٨***
کربن آلی= ١-٠/٥ (n=٥٢٤)	سیلت	-٠/٣٥***			
	کربن آلی	٠/١٤***	٠/٠٨^{ns}		
	pH	-٠/١٦***	٠/٠٢^{ns}	-٠/٠٧^{ns}	
	CEC	٠/٣٦***	٠/٢٠***	٠/٢٣***	-٠/٠٣^{ns}
کربن آلی > ١ (n=١٦٣)	سیلت	-٠/٥١***			
	کربن آلی	٠/٠٤^{ns}	-٠/١٠^{ns}		
	pH	-٠/١٥^{ns}	٠/١١^{ns}	٠/١٥^{ns}	
	CEC	٠/١٨*	٠/١٣^{ns}	٠/٠٩^{ns}	-٠/٠٤^{ns}

ادامه جدول ۲-

	متغیرها	رس	سیلت	کربن آلی	pH
ج) پس از گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار رس					
درصد رس < ۱۸٪ (n=۲۰٤)	سیلت	۰/٤۱***			
	کربن آلی	۰/۳۳***	۰/۳۲***		
	pH	-۰/۱۱ns	-۰/۱۵*	-۰/۰۹ns	
	CEC	۰/۳۵***	۰/۳۲***	۰/۱۵*	-۰/۰۰ns
درصد رس = ۳۵-۱۸٪ (n=۵۳٤)	سیلت	۰/۰۳ns			
	کربن آلی	۰/۱۸***	۰/۲٤***		
	pH	۰/۰۳ns	-۰/۲۰***	-۰/۱۷***	
	CEC	۰/۳۸***	۰/۱۸***	۰/۳۳***	۰/۰٤ns
درصد رس ≤۳۵٪ (n=٤۰۲)	سیلت	-۰/۵۵***			
	کربن آلی	-۰/۰۳ns	-۰/۰۲ns		
	pH	-۰/۱۰*	۰/۱۲*	-۰/۲۹***	
	CEC	-۰/۰٤ns	۰/۲۸***	۰/۰۸ns	۰/۰٤ns

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد و ns غیرمعنی‌دار.

عدم همبستگی CEC با pH احتمالاً بیانگر این مطلب است که بارهای موجود در خاک‌های مورد مطالعه به‌طور عموم مربوط به بارهای دایمی است نه وابسته به pH، که این امر به نوبه خود وابسته به مقدار اندک رس‌های اکسیدی و مواد آلی در این خاک‌هاست. همبستگی منفی و معنی‌دار میان کربن آلی و pH به این دلیل است که با افزایش کربن آلی خاک مقدار گاز دی‌اکسیدکربن به‌دست آمده از تجزیه آن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش گاز دی‌اکسیدکربن، اسید کربنیک بیش‌تری حاصل می‌شود، که باعث کاهش pH می‌گردد (اسپارکس، ۱۹۹۵). همبستگی مثبت و معنی‌دار CEC با pH در گروه کربن آلی ≥ ۰/۵ درصد نشان‌دهنده وجود بارهای وابسته به pH در خاک است، به‌طوری‌که با وجود کم‌تر بودن مقدار کربن آلی و رس خاک، بالا بودن pH خاک مقدار بارهای منفی و CEC خاک را افزایش داده و باعث همبستگی بالایی شده است (P≤۰/۰۰۱) (جدول ۲-

ب). بل و وانکولن (۱۹۹۵) pH خاک را به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل در ایجاد توابع پیش‌بینی‌کننده CEC در خاک‌های مکزیک مؤثر دانستند. براساس نتایج جدول‌های (۲- ب) و (۲- ج) در گروه‌بندی براساس درصد رس و کربن آلی، همبستگی CEC با این دو متغیر کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به کم شدن ضریب تغییرات کربن آلی و رس پس از گروه‌بندی خاک‌ها (جدول ۱) وکاهش سهم نسبی هر کدام از آن‌ها در تبیین تغییرات CEC خاک‌ها نسبت داد. در ضمن همبستگی ضعیف CEC با کربن آلی در خاک‌های با مقدار کم‌تر رس و بیش‌تر شن را می‌توان به سرعت افزون‌تر فرآیندهای تجزیه در خاک‌های شنی نسبت داد، که تهویه بیش‌تری دارند (توریس و همکاران، ۲۰۰۱). عدم همبستگی CEC با کربن آلی در خاک‌های با مقدار بیش‌تر رس به‌دلیل تهویه نامناسب خاک بوده و سرعت فرآیندهای تجزیه کم‌تر است و ترکیبات آلی در حالت اولیه خود باقی می‌مانند (جدول ۲- ج).

توابع انتقالی ایجاد شده و تأثیر گروه‌بندی خاک‌ها بر دقت و اعتبار آن‌ها

پیش از گروه‌بندی خاک‌ها: جدول (۳- الف) PTF های ایجاد شده برای برآورد CEC خاک‌ها را برای کل داده‌ها و گروه‌های ایجاد شده نشان می‌دهد. مقایسه آماره‌های ارزیابی *RMSE*، *ME* و d برای کل داده‌ها و گروه‌های ایجاد شده نشان داد که مقدار این آماره‌ها برای داده‌های آموزشی، اختلاف ناچیزی با داده‌های آزمون دارد (جدول ۳- الف). این نتایج نشان داد که در این پژوهش ارتباط نزدیکی میان دقت و اعتبار توابع انتقالی ایجاد شده وجود دارد. از بین معادلات ایجاد شده برای کل داده‌ها، معادله ۲ (جدول ۳- الف) با دو ورودی رس و کربن آلی که منجر به برآوردی مناسب‌تر از CEC خاک شد، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. این مطلب با نتایج ساهراوات (۱۹۸۳)، بل و ون‌کولن (۱۹۹۵)، امینی و همکاران (۲۰۰۵) و نوربخش و همکاران (۲۰۰۳)، که در بیش‌تر توابع آن‌ها نیز رس و کربن آلی به‌عنوان دو ویژگی اساسی وارد شده‌اند، هم‌خوانی دارد.

جدول ۳- توابع انتقالی سلسله مراتبی ایجاد شده برای برآورد گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) خاک.

	توابع انتقالی ایجاد شده[&]	آزمون دقت[$]				آزمون اعتبار[$]		
		ME	RMSE	d	DW	ME	RMSE	d
	الف) پیش از گروه‌بندی خاک‌ها (کل داده‌ها)							
۱	CEC=۹/۰۳ + ۰/۳۰۳C ($ß_1$=۰/۵۲)	۰/۰۱	٦/٤٧	۰/٦٤	۱/٤	−۲/٦٤	٦/۳۰	۰/۷۳
۲	CEC=۷/۷۱ + ۰/۲٦۱C + ٤/۰٦OC ($ß_1$=۰/٤٤۸) ($ß_3$=۰/۱۸٤)	−۰/۰۱	٦/۳٤	۰/٦۷	۱/٤	−۱/٦۲	۵/٤٦	۰/۸۲
۳	CEC=۳/۲۸ + ۰/۲۷۷C + ۰/۱۲۵Si + ۲/۸۸OC ($ß_1$=۰/٤۷۳) ($ß_2$=۰/۲۲۹) ($ß_3$=۰/۱۳)	۰/۰۲	٦/۱۱	۰/۷۱	۱/۵	−۱/۹۳	۵/۷۹	۰/۸۱
	ب) پس از گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار کربن آلی							
	کربن آلی ≥ ۰/۵		n=٤٤۷				n=۵۰	
۱	CEC=٦/۵۹ + ۰/۳٦۰C ($ß_1$=۰/٦۳۷)	۰/۰۰	۵/۷٦	۰/۷۵	۱/٦	−۱/۲۳	۵/۵٤	۰/۸
۲	CEC=۵/٦۰ + ۰/۳٤۹C + ۰/۰۳۷Si ($ß_1$=۰/٦۰۳) ($ß_2$=۰/۰۵۹)	−۰/۰٤	۵/٦۷	۰/۷۵	۱/۷	−۱/٤۳	۵/٦۰	۰/۸۰
	کربن آلی = ۱−۰/۵		n=۵۲٤				n=۷۷	
۳	CEC=۱۲/۲ + ۰/۲۰۹C ($ß_1$=۰/۳۵۵)	۰/۰۱	۰/۳٦	۰/٤۷	۱/٦	−۱/۸۸	۵/۷۲	۰/٦٤
٤	CEC=۲/۰۲ + ۰/۲۸٤C + ۰/۱۹۳Si ($ß_1$=۰/٤۸۱) ($ß_2$=۰/۳٦۷)	۰/۰۰	۵/۹۲	۰/٦۱	۱/۸	−۲/۲۵	٦/۰٦	۰/٦۷
۵	CEC= −۲/۱۰ + ۰/۲٦۹C + ۰/۱۸۲Si + ٦/۷۱OC ($ß_1$=۰/٤۵٤) ($ß_2$=۰/۳٤٦) ($ß_3$=۰/۱٤۲)	−۰/۰۲	۵/۸٤	۰/٦۳	۱/۹	−۲/۲۲	٦/۰۳	۰/٦۸
	کربن آلی < ۱		n=۱٦۳				n=۷۳	
٦	CEC=۱۸/۲ + ۰/۱۲٤C ($ß_1$=۰/۱۸۱)	۰/۰۲	۷/۰۸	۰/۲٤	۲/۰	−۲/۲۵	٦/۵۷	۰/۵۱
	ج) پس از گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار رس							
	درصد رس ≥ ۱۸٪		n=۲۰٤				n=٦۱	
۱	CEC=٦/٦۸ + ۰/۳۹۱C ($ß_1$=۰/۳٤۷)	۰/۰۰	٤/۲۸	۰/٤۳	۱/۹	−۳/۲۱	٦/۲۵	۰/٤۷
۲	CEC=۵/۸۹ + ۰/۲۸۷C + ۰/۰٦٦٤Si ($ß_1$=۰/۲۳۸) ($ß_2$=۰/۰۸۰)	−۰/۰۱	٤/۱۹	۰/٤۹	۱/۸	−۲/۸۹	٦/۲٦	۰/٤٦

ادامه جدول ٣-

	توابع انتقالی ایجاد شده[&]	آزمون دقت[$]				آزمون اعتبار[$]		
		ME	RMSE	d	DW	ME	RMSE	d
	درصد رس = ٣٥-١٨٪		n=٥٣٤				n=١٠٣	
٣	CEC=٤/٩٤ + ٠/٤٧٧C ($ß_1$=٠/٣٧٧)	٠/٠١	٥/٦٣	٠/٤٩	١/٦	-١/١٤	٥/٣٤	٠/٥١
٤	CEC=٣/٢٣ + ٠/٤١٥C + ٥/٢٨OC ($ß_1$=٠/٣٢٩) ($ß_2$=٠/٢٦٦)	٠/٠٠	٥/٤٠	٠/٥٨	١/٧	٠/٣٢	٤/٩٢	٠/٧١
	درصد رس ≤٣٥٪		n=٤٠٢				n=٦٨	
٥	CEC=١٦/٧ + ٠/١٦٠Si ($ß_2$=٠/٢٧٦)	٠/٠٢	٧/٣٥	٠/٣٥	١/٧	-٤/٨٠	٧/٩٣	٠/٤٩

[$] برای اطلاع از مفهوم ME، RMSE و d به رابطه‌های ١ تا ٣ در متن مراجعه شود. واحد ME و RMSE $cmolckg^{-1}$ است.

[&] در تمام توابع، CEC ($cmolckg^{-1}$) ظرفیت تبادل کاتیونی و C، Si و OC به‌ترتیب رس، سیلت و کربن آلی (درصد) هستند. $ß_1$، $ß_2$، $ß_3$ و $ß_4$ به‌ترتیب ضریب رگرسیون جزیی استاندارد شده برای رس، سیلت، کربن آلی و pH هستند.

تابع ٢ در جدول (٣- الف) دارای کم‌ترین مقدار *RMSE* (٥/٤٦) و بیشترین مقدار *d* (٠/٨٢) در مرحله اعتبار است. اما، این مدل نیز کارآیی بالایی ندارد. به‌نظر می‌رسد علت آن تفاوت ذاتی و پدوژنیکی خاک‌های مورد مطالعه و خواص مرتبط با آن مانند نوع رس و کربن آلی باشد و یا آن‌که شکل‌هایی پیچیده‌تر از روابط خطی و برهم‌کنش متغیرهای مستقل بر کمیت CEC تأثیر داشته باشند (معلمی و همکاران، ٢٠٠٩). نتایج نشان می‌دهد که از میان متغیرهای مستقل، رس با توجه به مقدار بالای ضریب رگرسیون جزیی استاندارد شده[1] (ß) اهمیت بیش‌تری دارد. ضریب ß بیانگر اهمیت نسبی تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است و هرچه، قدر مطلق مقدار ضریب ß بیش‌تر باشد درجه تأثیر آن بر متغیر وابسته بیش‌تر است (دوات‌گر و همکاران، ٢٠٠٦).

پس از گروه‌بندی براساس مقدار کربن آلی: جدول (٣- ب) PTFهای ایجاد شده برای برآورد CEC را بعد از گروه‌بندی خاک‌ها براساس کربن آلی نشان می‌دهد. نکته قابل‌توجه در این گروه‌بندی این است که کربن آلی در توابع گروه کم‌تر از ٠/٥ درصد وارد نشده است، که احتمالاً می‌توان آن رابه دلیل مقادیر کم OC و کاهش اثرات آن در خاک دانست. با این حال متغیر pH در

1- Standardized Partial Regression Coefficient

این توابع وارد شده است و ضریبی مثبت دارد. این نتیجه را می‌توان چنین توجیه کرد که بارهای وابسته به pH در OC بیش‌تر است و با افزایش pH، بار منفی آن افزایش می‌یابد (سیبولد و همکاران، ۲۰۰۵). گروه‌بندی خاک‌ها براساس کربن آلی برای ایجاد گروه‌های همگون‌تر خاک، فقط در گروه‌های با کربن آلی کم‌تر از ۰/۵ درصد و بین ۱-۰/۵ درصد منجر به افزایش d و کاهش $RMSE$، ME و در نتیجه بهبود در برآورد CEC توسط روش رگرسیون گام به گام شد که به‌نظر می‌رسد در این دو گروه نمونه‌ها همگونی بیش‌تری داشتند. در گروه با درصد کربن آلی ۱-۰/۵ دقت توابع از گروه با کربن آلی کم‌تر از ۰/۵ درصد نیز کم‌تر بود. احتمالاً با افزایش OC، تغییرات CEC هم افزوده شده و تبیین آن دشوارتر شده است (جدول ۳- ب). در گروه ۱ ≤OC، تابع مناسبی ایجاد نشد و با وجود میزان بالای کربن آلی، متغیر رس تنها ورودی تابع می‌باشد (جدول ۳- ب). به‌دلیل این‌که همبستگی بالایی میان مقدار رس و کربن آلی وجود دارد، زیرا ذرات رس موجب نگهداری کربن آلی خاک می‌شوند. همچنین، پایین بودن تهویه در خاک‌های رسی موجب عدم تجزیه کربن آلی شده و در نتیجه اثرات OC بر روی CEC کاهش می‌یابد. در مطالعات معلمی و دوات‌گر (۲۰۱۱) با وجود این‌که CEC بیش‌ترین همبستگی را با متغیر کربن آلی و بعد از آن با متغیر رس نشان داد، نتایج گروه‌بندی خاک‌ها براساس کربن آلی نشان‌دهنده عدم موفقیت این نوع گروه‌بندی در ایجاد جامعه همگون‌تر به‌منظور بهبود در برآورد CEC بود و در گروه با کربن آلی بیش‌تر از ۲ درصد، متغیر رس بیش‌ترین نقش را در بین متغیرهای ورودی برای برآورد CEC داشت. در این مطالعه نیز با توجه به مقدار ضرایب ß در گروه‌بندی براساس کربن آلی، متغیر رس اهمیت بیش‌تری دارد (جدول ۳- ب).

پس از گروه‌بندی براساس مقدار رس: جدول (۳- ج) PTFهای ایجاد شده برای برآورد CEC خاک‌ها بعد از گروه‌بندی براساس مقدار رس را نشان می‌دهد. توابع ایجاد شده براساس مقدار رس، ورودی‌هایی مشابه با کل داده‌ها دارد. در گروه‌بندی خاک‌ها براساس مقدار رس در دو گروه رس <۱۸ درصد و رس ۳۵-۱۸ درصد مقدار آماره $RMSE$ کم‌تر از کل داده‌ها و گروه‌بندی براساس کربن آلی است که نشان‌دهنده افزایش دقت برآورد CEC خاک پس از گروه‌بندی براساس مقدار رس است. توابع ایجاد شده برای برآورد CEC خاک‌ها پس از گروه‌بندی براساس مقدار رس، دقت بیش‌تری داشتند ولی در گروه با رس <۱۸ درصد اعتبار توابع کاهش یافت. دلیل احتمالی این امر، کوچک شدن حجم مجموعه داده‌های آموزش و تبیین بخش کم‌تری از تغییرات CEC توسط توابع ایجاد شده است.

در میزان رس بیش‌تر از ۳۵ درصد توابع خوبی ایجاد نشد و هیچ‌کدام از متغیرهای رس و کربن آلی وارد توابع نشدند، که احتمالاً به‌دلیل تغییرپذیری بسیار پایین رس در این گروه است (جدول ۱- ج). سیلت چون تغییرپذیری بیش‌تری داشت، توانست بخش بیش‌تری از تغییرات CEC را تبیین نماید. ضریب ß یا اهمیت نسبی متغیر سیلت بر روی CEC به‌نسبت بالا و بیش‌تر از حالت پیش از گروه‌بندی است. سیبولد و همکاران (۲۰۰۵) از سیلت به‌عنوان یک متغیر مؤثر پیش‌بینی‌کننده CEC در گروه‌بندی خاک‌ها استفاده کردند. ممکن است CEC بیش‌تر به نوع رس و نه مقدار کل آن وابسته بوده است ولی در این مطالعه اطلاعاتی از نوع رس برای وارد کردن در توابع در دسترس نبود.

نتیجه‌گیری

در خاک‌هایی با مقادیر کربن آلی کم‌تر از ۰/۵ درصد- که عمده خاک‌های بخش‌های خشک و نیمه‌خشک ایران را در برمی‌گیرد- تنها با استفاده از درصد رس به‌عنوان ورودی، می‌توان CEC را با دقت قابل‌قبولی برآورد کرد. گروه‌بندی خاک‌ها براساس کربن آلی یا رس از اعتبار توابع کاست، با این‌حال گروه‌بندی براساس مقدار رس به‌جز در خاک‌هایی با مقدار رس ≤ ۳۵ درصد، تأثیر بیش‌تری در بهبود دقت و اعتبار توابع داشت. نتایج همچنین نشان داد، رس (به‌جز در خاک‌هایی با مقدار رس ≤ ۳۵ درصد) تأثیرگذارترین عامل در برآورد CEC خاک‌های مورد مطالعه بود به‌طوری‌که با وارد نمودن متغیرهای دیگر بهبود چشم‌گیری در دقت و اعتبار توابع به‌دست نیامد. در صورتی‌که داده‌های مربوط به خواص اثرگذار بر برآورد گنجایش تبادل کاتیونی مانند نوع کانی رس در بانک داده‌ها وجود داشته باشد به احتمال زیاد دقت و اعتبار معادله‌های برآوردکننده بهبود می‌یابد. اما در هر صورت نوع کانی‌های رسی جزء متغیرهای زودیافت خاک به‌شمار نمی‌رود. گفتنی است برآورد CEC با استفاده از توابع ایجاد شده هرگز نمی‌تواند به‌طور کامل جایگزین اندازه‌گیری CEC خاک گردد. بنابراین استفاده از این توابع تنها در مواردی که نیاز به برآورد CEC (و نه اطلاع از میزان دقیق آن) وجود دارد، پیشنهاد می‌شود. بهتر است پیش از کاربرد این توابع در هر منطقه اعتبار آن‌ها با استفاده از داده‌هایی دقیق از آن منطقه آزموده شود.

منابع

1.Amini, M., Abbaspour, K.C., Khademi, H., Fathianpour, N., Afyuni, M., and Schulin, R. 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid region of Iran. Eur. J. Soil Sci. 56: 551-559.
2.Arnaud, R.J., and Septon, G.A. 1972. Contribution of clay and organic matter to catoin exchange capacity of chernozemic soils. Can. J. Soil Sci. 52: 124-126.
3.Bell, M.A., and van Keulen, H. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 865-871.
4.Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Adv. Soil Sci. Soc. Am. J. 9: 177-213.
5.Bower, C.A., Reitemeier, P.F., and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. J. Soil Sci. 73: 251-261.
6.Breeuwsma, A., Wosten, J.H.M., Vleeshouwer, J.J., Van Slobbe, A.M., and Bouma, J. 1986. Derivation of land qualities to assess environmental problems from soil surveys. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 186-190.
7.Carpena, O., Lux, A., and vahtras, K. 1972. Determination of exchangeable calcareous soils. Soil Sci. 33: 194-199.
8.Carsel, R.F., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., and Hummel, P.R. 1991. Development of a database and model parameter analysis system for agricultural soils. J. Environ. Qual. 20: 642-647.
9.Davatgar, N., Kavoosi, M., Alinia, M.H., and Paykan, M. 2006. Study of Potassium Status and Effect of Physical and Chemical Properties of Soil on it in Paddy Soils of Guilan Province. Water Soil Sci. (J. Agric. Sci. Natur. Resour). 9: 4. 71-89.
10.Drake, E.H., and Motto, H.L. 1982. An Analysis of the effect of clay and organic matter content on cation exchang capacity of New Jersey soil. Soil Sci. 133: 5. 281-288.
11.Fernando, M.J., Burau, R.G., and Arulanandam, K. 1977. A new approach to determination of cation exchange capacity. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 818-820.
12.Foth, H.D., and Ellis, B.G. 1997. Soil fertility. 2 ed. Lewis Pub., Boca Raton, FL, USA.
13.Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (ed.), Methods of soil analysis. Part 2: Physical properties. SSSA: Madison, WI.
14.Ghorbani Dashtaki, S., Homaee, M., and Khodaverdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. Soil Use Manage. 26: 1. 68-74.
15.Haskett, J., Pachepsky, Ya.A., and Acock, B. 1996. Estimation of soybean yields at county and state level using GLYCIM: A case study for Iowa. Agron. J. 87: 926-931.
16.Horn, A.L., Düring, R.A., and Gäth, S. 2005. Comparison of the prediction efficiency of two pedotransfer functions for soil cation-exchange capacity. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168: 372-374.

17. Keller, A., von Stiger, B., van der Zee, S.T., and Schulin, R. 2001. A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. J. Environ. Qual. 30: 1976-1989.
18. Khodaverdiloo, H., Homaee, M., van Genuchten, M.Th., and Ghorbani Dashtaki, Sh. 2011. Deriving and Validating Pedotransfer Functions for some Calcareous Soils. J. Hydrol. 399: 93-99.
19. Khodaverdiloo, H., and Samadi, A. 2011. Batch equilibrium study on sorption, desorption, and immobilization of cadmium in some semiarid-zone soils as affected by soil properties. Soil Res. 49: 5. 444-454.
20. MacDonald, K.B. 1998. Development of pedotransfer functions of southern Ontario soils Report from greenhouse and processing crops research center. Harrow, Ontario, No: 01686-8-0436, Pp: 1-23.
21. Manrique, L.A., Jones, C.A., and Dyke, P.T. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 787-794.
22. McBratney, A.B., Minasny, B., Cattle, S.R., and Vervoort, R.W. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma. 109: 41-73.
23. McFee, W.W. 1983. Sensitivity rating of soils to acid deposition: a review. Envion. Exp. Bot. 23: 203-210.
24. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, P 199-224. In: Page, A.L. (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. SSSA. Madison, Wisconsin.
25. Miller, W.F. 1970. Inter-regional predictability of cation-exchange capacity by multiple regressions. Plant Soil. 33: 721-725.
26. Mirkhani, R., Shaabanpour, M., and Saadat, S. 2005. Using Particle Size Distribution and Organic Carbon Percentage to Predict the Cation Exchange Capacity of Soils of Lorestan Province. Iran. J. Soil Water Sci. 19: 2. 235-242.
27. Moallemi, S., Davatgar, N., and Darigh Goftar, F. 2009. Estimation of Cation Exchange Capacity in Guilan Soils. Iran. J. Soil Resour. 23: 2. 173-179.
28. Moallemi, S., and Davatgar, N. 2011. Comparison of Artificial Neural Network and Regression Pedotransfer Functions for Prediction of Cation Exchange Capacity in Guilan Province Soils. Water Soil Sci. (J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour). 15: 55. 169-182.
29. Mohajer, R., Salehi, M., and Beigi Herchegani, H. 2009. Estimating Soil cation exchange capacity (in View of Pedotransfer Functions) Using Regression and Artificial Neural Networks and the Effect of Data Partitioning on Accuracy and Precision of Functions. Water Soil Sci. (J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour). 13: 49. 83-97.
30. Nelson, D.W., and Sommers, L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter, P 539-579. In: Page, A.L. (ed.), Methods of Soil Analysis: Part 2, Agronomy Handbook No 9, American Society of Agronomy and Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

31. Nourbakhsh, F., Jalalian, A., and Shariatmadari, H. 2003. Estimation of Cation Exchange Capacity from Some Soil Physical and Chemical Properties. Water Soil Sci. (J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour). 7: 3. 107-118.
32. Pachepsky, Ya.A., and Rawls, W.J. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 727-733.
33. Pachepsky, Ya.A., Timlin, D., and Varallyay, G. 1996. Artificial Neural Networks to estimate soil water retention from easily measurable data. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 727-733.
34. Parfitt, R.L., Giltrap, D.J., and Whitton, J.S. 1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26: 1343-1355.
35. Rasiah, V. 1995. Comparison of pedotransfer functions to predict nitrogen-mineralization parameters of one-and two-pool models. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26: 1873-1884.
36. Rogowski, A.S., and Wolf, J.K. 1994. Incorporating variability in soil map units delineation. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 163-174.
37. Sahrawat, K.L. 1983. An analysis of the contribution of organic matter and clay to cation exchange capacity of some Philippine soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 14: 803-809.
38. Seybold, C.A., Grossman, R.B., and Reinsch, T.G. 2005. Preicting Cation Exchange Capacity for Soil Survey Using Linear Models. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 856-86.
39. Sparks, D.L. 1995. Environmental Soil Chemistry. Academic Press. Inc., NY., USA.
40. Thuries, L., Pansu, M., Feller, C., Herrmann, P., and Remy, J.C. 2001. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediteranean sandy soil. Soil Biol. Biochem. 33: 997-1010.
41. Van Alphen, B.J., Booltinks, H.W.J., and Bouma, J. 2001. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. Geoderma. 103: 133-147.
42. Wilding, L.P., and Dress, L.R. 1983. Spatial variability and pedology, P 83-116. In: Wilding, L.P., N.E. Smeck, and G.F. Hall (eds.), pedogensis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Elsevier Sci. Pub., North Holland.
43. Wosten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer function: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. J. Hydrol. 251: 123-150.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 4(4), 2015
http://ejsms.gau.ac.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effect of grouping soils based on their organic carbon and clay content on performance of hierarchical pedotransfer functions of soil cation exchange capacity

N. Hosseini Arabloo[1], *H. Khodaverdiloo[2], Sh. Ghorbani Dashtaki[3] and H.R. Momtaz[4]

[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Mianeh Branch, Islamic Azad University, Mianeh, Iran, [2]Associate Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, [3]Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University, [4]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University

Received: 03/16/2014; Accepted: 08/02/2014

Abstract

Cation exchange capacity (CEC) is one of the main factors in monitoring and management of soil quality in order to achieve sustainable production. Although CEC can be measured directly, these measurements are difficult, time-consuming and costly, especially for Aridisols due to their high amounts of calcium and gypsum. One alternative method to direct measurements is the use of pedotransfer functions (PTF), in which CEC of soils is estimated through available soil information. A dataset including 1141 data points was used as the calibration set for development and accuracy test of functions and another independent data set with 232 data points was used for validation of the PTFs. The results showed that, grouping the soils based on clay and organic carbon contents are generally reduced the coefficient of variation of clay, organic carbon and CEC. In general, the grouping of soils declined the correlation of clay and organic carbon with CEC. In soils with organic carbon contents of less than 0.5%, CEC was predicted with reasonable accuracy using only the clay as input. Generally, grouping the soils enhanced the accuracy of the PTFs, while in most cases decreased their reliability. However grouping the soils based on their clay content, except for soils with clay content ≥ 35%, was more effective in improving the accuracy and reliability of the functions. Results also showed that clay (except for soil with clay content of ≥ 35%) was the most influential factor in predicting the CEC of the soils, so that including the other variables did not significantly improve the accuracy and reliability of the functions.

Keywords: Pedotransfer functions, Cation exchange capacity, Readily available soil properties

* Corresponding Authors; Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir