رابطه بین گنجایش تبادل کاتیونی و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در خاکهای گیلان

سمیّه معلّمی،[۱*] ناصر دوات‌گر و فرحناز دریغ‌گفتار

کارشناس ارشد خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان؛ **smoaallemi@yahoo.com**

مربی پژوهش موسسه تحقیقات برنج کشور؛ **n_davatgar@yahoo.com**

کارشناس آزمایشگاه شیمی خاک موسسه تحقیقات برنج کشور؛ **fd.darighgoftar@yahoo.com**

چکیده

اندازه‌گیری گنجایش تبادل کاتیونی خاکها، CEC، که از خواص شیمیایی مهم تاثیرگذار بر سایر خواص فیزیکی، هیدرولیکی، حاصلخیزی و بیولوژیکی خاک می‌باشد، با وجود ضروری بودن، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است. استفاده از برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی که با سهولت و هزینه کمتر اندازه‌گیری می‌شوند، می‌تواند در پیش‌بینی گنجایش تبادل کاتیونی موثر باشد. هدف از این تحقیق ایجاد یک تابع انتقالی مناسب برای برآورد گنجایش تبادل کاتیونی خاکهای استان گیلان با استفاده از توزیع اندازه ذرات، درصد کربن‌آلی و pH می‌باشد. برای این تحقیق از ۱۶۷۶ داده مربوط به خاکهای استان گیلان از بانک اطلاعات آزمایشگاه شیمی خاک موسسه تحقیقات برنج کشور استفاده گردید. ۱۲۶۰ داده به عنوان داده‌های آموزشی (برای ایجاد مدل) و ۴۱۶ داده به عنوان داده‌های آزمونی (برای ارزیابی اعتبار تابع) مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از روش رگرسیون چندگانه، متغیرها به روش گام به گام پیشرو گزینش و وارد مدل شدند. مدل ایجاد شده (CEC = ۱۵/۵۲۴ + ۰/۳۲ Clay + ۷/۸۶۳ $OC^{0.5}$ – ۱/۴۵۳ pH) با بقیه مدلهای منتشر شده در منابع مقایسه و با توجه به بالاتر بودن ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و کمتر بودن مقادیر آماره‌های ME و RMSE، به عنوان مدل برتر انتخاب شد. نتایج نشان داد که متغیرهای رس، کربن‌آلی و pH، ۴۲/۸ درصد از تغییرات CEC را توجیه می‌نمایند و در این میان با توجه به ضریب ß نقش رس بیشتر از بقیه متغیرها است.

واژه های کلیدی: گنجایش تبادلی کاتیونی، توزیع اندازه ذرات، درصد کربن‌آلی، pH، توابع انتقالی، استان گیلان

مقدمه

در سالهای اخیر مدلهای شبیه سازی فرایندهای خاک به سرعت افزایش یافته‌اند. جمع‌آوری داده‌های خصوصیات خاک یک نیاز اساسی برای تغذیه مدلهای مدیریتی یا شبیه‌سازی فرایندهای محیطی است. خصوصیات خاک می‌توانند بسیار متغیر و موقتی باشند و به این جهت اندازه‌گیری مستقیم بعضی از آنها به دلیل نمونه‌برداری فراوان مستلزم صرف هزینه و وقت بسیار است. بنابراین در سالهای اخیر روش‌های غیر مستقیم مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روشها، توابع انتقالی خاک می‌باشد که داده‌های دیریافت خاک را از داده‌های زودیافت آن برآورد می‌کنند. توابع انتقالی با ترجمه اطلاعات این خواص پایه‌ای به عنوان عوامل تخمین زننده خصوصیاتی از خاک که اندازه‌گیریشان پرهزینه و وقت‌گیر است، موجب افزایش ارزش آنها می‌شوند (Mc Brateny و همکاران (۲۰۰۲)). ایجاد توابع انتقالی جدید وظیفه‌ای سخت است، بنابراین منطقی است

۱- نویسنده مسئول، آدرس: رشت، موسسه تحقیقات برنج کشور، کدپستی ۱۳۴۷۵-۴۱۹۹۶

* دریافت: ۸۷/۱/۲۴ و پذیرش: ۸۸/۷/۲۱

که از توابعی که از قبل ایجاد شده است، استفاده گردد. اما، از یک تابع انتقالی نمی‌بایست در آن سوی ناحیه جغرافیایی یا تیپ خاک که در آن شرایط ساخته شده است، برون‌یابی کرد (Mc Brateny و همکاران (۲۰۰۲)). بنابراین لازم است قبل از هرگونه استفاده‌ای از این توابع، نسبت به تعیین اعتبار ناحیه‌ایی آنها مبادرت نمود.

اگرچه اغلب توابع انتقالی خاک برای برآورد خواص هیدرولیکی خاک ایجاد شده‌اند. اما، استفاده از این توابع به خواص هیدرولیکی محدود نشده و برای برآورد خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک نیز بکار رفته‌اند (Mc Brateny و همکاران (۲۰۰۲)). گنجایش تبادل کاتیونی، CEC، از جمله خصوصیات شیمیایی خاک است که هر چند امکان اندازه‌گیری مستقیم آن وجود دارد. اما، این اندازه‌گیری پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. توابع انتقالی یک راهکار مفید در تخمین گنجایش تبادل کاتیونی از خصوصیات زودیافت خاک می‌باشد. در سالهای اخیر توابع انتقالی مختلفی برای تخمین CEC از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ایجاد شده است (Bell و van Keulen (۱۹۹۵)؛ Mc Brateny و همکاران (۲۰۰۲)؛ Manrique و همکاران (۱۹۹۱)؛ Breeuwsma و همکاران (۱۹۸۶)). در بیشتر این مدلها CEC تابعی خطی از موادآلی و مقدار رس می‌باشد (Amini و همکاران (۲۰۰۵)). اگرچه مواد جامد خاک به درجات مختلف در ایجاد مکانهای تبادل کاتیونی نقش دارند. اما، این خصوصیت در بیشتر خاکها در بخش رس و موادآلی آنها متمرکز است (Miller و همکاران (۱۹۷۰)؛ Seybold و همکاران (۲۰۰۵)). در حقیقت بخش اعظم CEC خاک اختصاص به موادآلی خاک دارد، و با افزایش درجه هوموسی شدن افزایش می‌یابد (محمودی و حکیمیان (۱۳۷۷)). گنجایش تبادل کاتیونی رسها به علت تفاوت در منشأ بار الکتریکی منفی سطح کانیها بسیار متغیر بوده و مقدار آن بسته به نوع بار (دایم یا وابسته به pH) متفاوت خواهد بود (Miller و همکاران (۱۹۷۰)؛ Sparks (۱۹۵۳)). گنجایش تبادل کاتیونی خاکها تابع pH خاک نیز هست (Miller و همکاران (۱۹۷۰)). گنجایش تبادل کاتیونی تمامی هوموس و رسهای اکسیدی و بخشی از رسهای سیلیکاته تابع pH محیط است (Seybold و همکاران (۲۰۰۵)). Bell و van Keulen (۱۹۹۵) pH خاک را به عنوان یکی از متغیرهای مستقل در ایجاد توابع پیش‌بینی کننده CEC در خاکهای مکزیک موثر دانسته‌اند. ذرات شن و سیلت هم دارای بار الکتریکی منفی خنثی نشده می‌باشند. اما، به علت سطح رویه کم، اثرات بسیار ناچیزی در گنجایش تبادل کاتیونی خاکها ایجاد می‌کنند. Seybold و همکاران (۲۰۰۵) در ایجاد مدلهای جامع پیش‌بینی کننده CEC از مقدار کربن‌آلی، رس، سیلت و pH خاک به عنوان متغیرهای غالب و مستقل استفاده کردند. Horn و همکاران (۲۰۰۵) نیز مقدار رس و کربن‌آلی را از جمله خصوصیات مهم در پیش‌بینی مقدار CEC دانسته‌اند. Parfitt و همکاران (۱۹۹۵) علاوه بر مقدار کربن‌آلی و مقدار رس، نوع کانی‌های رسی را نیز در پیش‌بینی مقدار گنجایش تبادل کاتیونی مؤثر دانسته‌اند. کریمیان (۱۳۷۵) از متغیرهای رس و موادآلی و نوربخش و همکاران (۱۳۸۲) نیز از مقدار رس، درصد اندازه ذرات و pH برای پیش‌بینی گنجایش تبادل کاتیونی خاکهای خود استفاده کردند. میرخانی و همکاران (۱۳۸۴) در برآورد گنجایش تبادل کاتیونی خاکهای لرستان ضریب همبستگی بالایی میان مقدار رس، سیلت و کربن آلی با CEC این خاکها بدست آوردند. با توجه به مطالب ذکر شده اهداف این تحقیق عبارتند از:

۱) شناخت وضعیت CEC و متغیرهای مؤثر بر آن در خاکهای استان گیلان

۲) ایجاد مدلهای مختلف توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد گنجایش تبادل کاتیونی در خاکهای استان

۳) مقایسه مدلهای ایجاد شده با دیگر مدلهای رگرسیونی موجود

روش تحقیق

برای این تحقیق از ۱۶۷۶ داده خاک مربوط به استان گیلان از بانک اطلاعات آزمایشگاه شیمی خاک موسسه تحقیقات برنج کشور استفاده گردید.

متغیرهای استفاده شده برای پیش‌بینی گنجایش تبادل کاتیونی عبارت بودند از: pH خاک در گل اشباع، کربن‌آلی اندازه‌گیری شده به روش والکلی و بلاک و توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتر. گنجایش تبادل کاتیونی نیز به روش استات سدیم در pH ۸/۲ اندازه‌گیری شد (احیایی (۱۳۷۶)؛ احیایی و بهبهانی‌زاده (۱۳۷۲)).

بعد از مشخص نمودن آمار توصیفی (کمترین، بیشترین، میانگین، واریانس، چولگی و کشیدگی) و آزمون نرمال توزیع فراوانی متغیرها، برازش این متغیرها بر گنجایش تبادل کاتیونی از طریق روابط رگرسیون گام به گام پیشرو انجام گردید. برای ایجاد بهترین تابع انتقالی پیش‌بینی کننده، ابتدا داده‌ها پس از تصادفی نمودن، به دو گروه مجزا تقسیم شدند. ۱۲۶۰ داده به عنوان داده‌های آموزشی و ۴۱۶ داده به عنوان داده‌های آزمونی مورد استفاده قرار گرفتند. برای تعیین صحت و اعتبار مدلها از آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین تعدیل شده (R2adj)، میانگین خطا (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و برتری نسبی (RI) استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)}{N} \quad (۳)$$

در این آماره‌ها y_i مقادیر واقعی داده‌ها، $\hat{y}_i$ مقادیر برآورد شده توسط مدل، $\bar{y}_i$ میانگین مقادیر واقعی و N تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

$$RI = \frac{RMSE_a - RMSE_b}{RMSE_a} \times 100 \quad (۴)$$

$RMSE_a$: ریشه دوم میانگین مربعات خطای مربوط به مدل a

$RMSE_b$: ریشه دوم میانگین مربعات خطای مربوط به مدل b

RI: برتری نسبی مدل b بر a

نتایج

پارامترهای آمار توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. pH خاکها در دامنه ۴/۱ تا ۸/۸ قرار دارد و میانگین آن ۶/۹۶ است. واریانس و ضریب تغییرات آن کم و توزیع فراوانی جمعیت آن غیر نرمال است. pH کم و اسیدی مربوط به خاکهای زیر کشت گیاه چای و pH زیاد عمدتاً مربوط به خاکهای بازی مربوط به باغهای زیتون است. کربن‌آلی خاکها در دامنه ۰/۰۰ تا ۹/۰۲٪ و میانگین آن ۲/۱۲٪ می‌باشد. ضریب تغییرات کربن‌آلی زیاد است، مقادیر ناچیز کربن آلی عمدتاً مربوط به اراضی شنی ساحلی و خاکهای مربوط به باغهای زیتون و مقادیر زیاد آن عمدتاً در اراضی پست شالیزاری مشاهده می‌شود که احتمالاً در بخش عمده‌ای از طول سال غرقاب هستند. ضریب تغییرات (CV) که معیاری از تغییرپذیری نسبی است برای متغیرهای کربن‌آلی، رس و CEC بالاتر از ۳۵٪ است که بر اساس طبقه‌بندی Wilding و Dress (۱۹۸۳) در گروه متغیرهای با ضریب حداکثر طبقه‌بندی می‌شوند. بالا بودن ضریب تغییرات نشان دهنده آن است که متغیرهای فوق بیشتر تحت تأثیر عملیات مدیریتی کشت قرار گرفته‌اند. ضریب تغییرات برای متغیر pH کمتر از ۱۵٪ و برای سیلت بین ۳۵-۱۵٪ بوده که بر اساس طبقه‌بندی Wilding و Dress (۱۹۸۳) به ترتیب در گروه متغیرهای با ضریب حداقل و متوسط طبقه‌بندی می‌شوند.

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون معنی‌دار بودن چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفت. از میان متغیرهای مورد بررسی فقط درصد رس و گنجایش تبادل کاتیونی دارای توزیع فراوانی نرمال هستند (جدول ۱). سیلت و کربن‌آلی با استفاده از تبدیلات زیر به نرمال تبدیل شدند:

$Silt^* = Silt^{1.5}$ $\qquad$ $OC^* = OC^{0.5}$

پس از نرمال نمودن توزیع داده‌ها و تصحیح همراستایی بین متغیرهای مستقل، از روش رگرسیون چندگانه متغیر خطی گام به گام پیشرو برای برآورد گنجایش تبادل کاتیونی استفاده شد.

در مجموعه داده‌های آموزشی و بر پایه آماره‌های ارزیابی مدل مندرج در جدول شماره دو در میان توابع انتقالی ایجاد شده (بقیه توابع نشان داده نشده‌اند) به علت بیشتر بودن ضریب R2adj (۰/۴۲۸)، کم‌تر بودن مقادیر آماره‌های ME (۲/۴۷۲E-۶-) و RMSE (۸/۷۷۸E-۵) به عنوان بهترین مدل انتخاب شد (جدول ۲).

در این مدل مقدار رس، کربن‌آلی و pH به ترتیب به عنوان مهمترین متغیرهای مستقل برآورد کننده گنجایش تبادل کاتیونی انتخاب شدند به طوری که با توجه به ضریب تبیین تعدیل شده (R2adj)، ۴۳ درصد از تغییرات CEC به وسیلهٔ آنها قابل بیان می‌باشد. به نظر می‌رسد عوامل دیگری نیز مانند نوع کانی و کیفیت ماده‌آلی بر گنجایش تبادل کاتیونی موثر باشند که اثر آنها به علت فقدان این متغیرها در بانک اطلاعات داده‌های آموزشی در مدل کمّی نشده است یا آنکه شکل‌های پیچیده‌تر از روابط خطی و برهم‌کنش متغیرهای مستقل بر کمّیت گنجایش تبادل کاتیونی وجود داشته باشند. ضریب رگرسیون جزیی استاندارد شده (standardized partial regression coefficient) (ß) بیانگر اهمیت نسبی تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است و هر متغیر مستقلی که قدر مطلق مقدار ضریب ß در آن بیشتر باشد درجه تأثیر آن بر متغیر وابسته بیشتر است (دوات‌گر و همکاران (۱۳۸۴)). نتایج نشان می‌دهد که از میان متغیرهای مستقل رس و بعد از آن کربن‌آلی با توجه به ضریب ß از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. اثر کربن‌آلی بر CEC به علت سطح ویژه زیاد و گروههای عاملی آن و در رس ناشی از سطح ویژه و تراکم بار الکتریکی می‌باشد.

نتایج آزمون نشان داد که مدل شماره ۱ (ساخته شده بر پایه داده‌های خاکی ناحیه گیلان) در مقایسه با دیگر مدلهای ارزیابی شده دارای R2adj بیشتر و ME و RMSE کمتر است (جدول ۳). اما، این مدل نیز با توجه ضریب تبیین تعدیل شده (R2adj=۰/۵۱۲) از قدرت بالایی برخوردار نیست. به نظر می‌رسد علت آن تفاوت ژنتیکی خاکهای ناحیه و خواص مرتبط با آن مانند نوع رس و کربن‌آلی باشد. بغدادی (۱۳۷۷) نشان داد که در خاکهای استان گیلان هفت رده آلفی‌سول، اریدی‌سول، انتی‌سول، اینسپتی‌سول، مولی‌سول و اولتی‌سول وجود دارند. در صورت وجود داده‌های مربوط به خواص اثرگذار بر برآورد گنجایش تبادل کانیونی مانند نوع کانی رسی در بانک داده‌ها به احتمال زیاد دقت و صحت معادلات برآورد کننده بهبود می‌یافت. Pachepsky و Rawls (۱۹۹۹) نیز نشان دادند که وقتی خاکها بر پایه مشابهت در منشا یا خواص گروه‌بندی گردند، صحت مدلهای پیش‌بینی کننده بهبود می‌یابد.

شاخص RI که معیاری از برتری یک مدل نسبت به مدل دیگر می‌باشد به ترتیب در مدل پیشنهادی (مدل شماره ۱) و مدل Manrique و همکاران (۱۹۹۱) (مدل شماره ۴) برابر با ۵۹/۳۴ و ۳۲/۸۷ درصد می‌باشد (جدول ۳).

برای ارزیابی اعتبار توابع انتقالی منحنی همبستگی مقادیر اندازه‌گیری شده گنجایش تبادل کاتیونی و مقادیر برآورد شده توسط آنها با این فرض که از لحاظ تئوری دقیق‌ترین پیش‌بینی هنگامی است که مقادیر پیش‌بینی شده کمترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشند، خطوط رگرسیونی برازش شده با خط عبوری از نقطه ($x = 0 , y = 0$) و با شیب ۱:۱ مقایسه شدند (شکل ۱).

مقایسه نمودار داده‌های برآورد شده از مدلهای مختلف در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل ۱) نشان داد که در مدلهای ۲، ۳، ۴ و ۵ برآوردها کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. علت این رویداد می‌تواند ناشی از تفاوت در دامنه داده‌های متغیرهای استفاده شده در ساخت مدل و ناحیه مورد مطالعه، تفاوت در وضعیت پدولوژیکی شرایط ساخت مدل و ناحیه مورد مطالعه، تفاوت در روش اندازه‌گیری متغیرها، تفاوت در نوع کانی غالب در جزء رس و وجود خطاهای تصادفی و نظامدار در جریان نمونه برداری، آماده سازی و اندازه‌گیری متغیرها باشد.

شیب خط در مدل پیشنهادی (مدل شماره ۱) در دامنه مقادیر از ۰ تا ۳۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم از CEC، به ۱ نزدیک است و در نتیجه می‌توان از مدل پیشنهادی در این دامنه با اطمینان از صحت بیشتر، استفاده کرد. در مقادیر بیشتر از ۳۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم، مقادیر برآورد شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است، که بیشتر منطبق با خاکهای با کربن‌آلی زیاد است. به نظر می‌رسد یکی از عوامل انحراف تفاوت در مقدار و درجه هوموسی شدن کربن‌آلی خاکها باشد. در نمونه خاکهای شالیزاری به علت غرقاب بودن خاکها و کمبود تهویه فرایند اکسیداسیون و تجزیه ماده‌آلی به کندی انجام می‌شود. در نتیجه در این خاکها موادآلی خام انباشت نموده، اما به علت کندی فرایند تجزیه، نولید هوموس که در گنجایش تبادل کاتیونی موثر است، کمتر است.

نتایج و ضرایب آماری مدل برآورد شده (مدل شماره ۱)، با وجود برتری این مدل بر بقیه مدلهای مطالعه شده، خیلی قوی نمی‌باشد.

جدول ۱- خلاصه آمار توصیفی خواص فیزیکی و شیمیایی اندازه گیری شده در خاکهای مورد مطالعه

متغیر (واحد)	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی	شکل توزیع فراوانی
pH	۴/۱	۸/۸	۶/۹۶۶۵	۰/۶۲۴۷۲	۱۱/۳۴۵۵۸۲	−۰/۸۸۸**	−۰/۱۶۳$^{n.s}$	غیرنرمال
OC (%)	۰/۰۰	۹/۰۲	۲/۱۲۰۸	۲/۲۳۴۴۱	۷۰/۴۸۲۳۵۶	۰/۸۹۴**	۰/۵۵۹**	غیرنرمال
Clay (%)	۰/۰۰	۶۹/۸۰	۳۲/۰۸۵۰	۱۹۲/۴۹۶۱۶	۴۳/۲۴۲۳۲۵	−۰/۴۹$^{n.s}$	−۰/۵۹۸**	نرمال
Silt (%)	۱/۰۰	۹۴/۰۰	۴۲/۳۲۲۵	۱۳۹/۰۲۸۵۵	۲۷/۸۵۹۹۷۹	−۰/۷۴۵**	۱/۸۳۵**	غیرنرمال
CEC (cmol(+)/kg)	۲/۲۹	۵۶/۵۱	۲۶/۳۱۶۱	۸۶/۵۸۴۹۶	۳۵/۳۵۸۹۶۲	۰/۰۰۲$^{n.s}$	−۰/۳۱۳**	نرمال

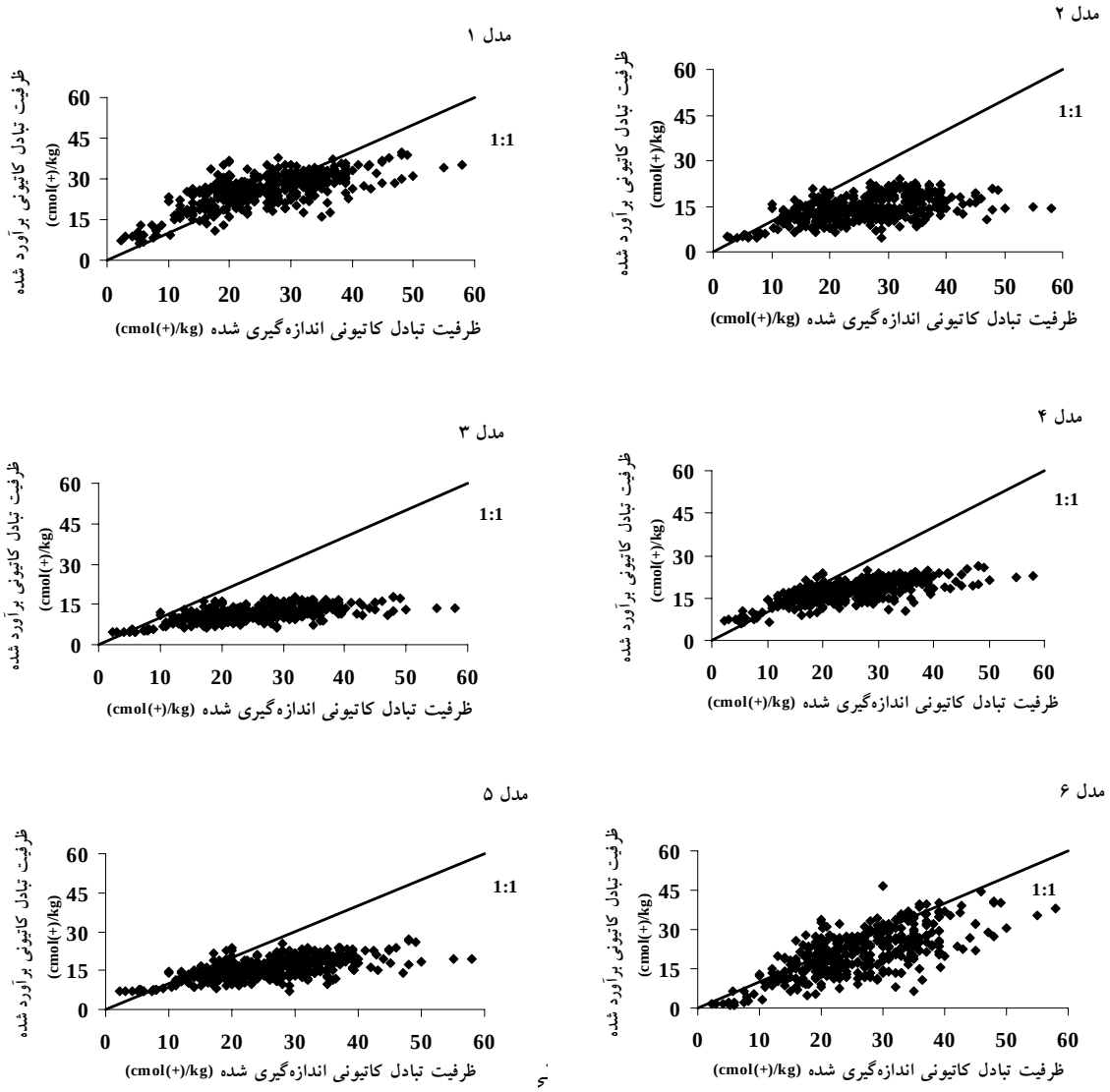
جدول ۲- مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده (R2adj)، میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای بهترین مدل انتخاب شده بر پایه داده‌های آموزشی

$CEC=۱۵/۵۲۴ + ۰/۳۲\ Clay + ۷/۸۶۳\ OC^{۰/۵} - ۱/۴۵۳\ pH$

ضریب ß	متغیر		
۰/۴۷۸	Clay	۰/۴۲۸	R^2_{adj}
۰/۴۴۹	OC	$۲/۴۷۲E^{-۶}$	ME
−۰/۱۲۲	pH	$^{۵}E^{-}۸/۷۷۸$	RMSE

جدول ۳- نتایج مقایسه آماره‌های ضریب تبیین تعدیل شده، میانگین خطا، ریشه میانگین مربعات خطا و برتری نسبی برای داده‌های آزمونی تابع انتقالی ایجاد شده با توابع انتقالی موجود در منابع

مدل	منبع	مدل تابع انتقالی	R^2_{adj}	ME	RMSE	RI (%)
۱	همین مقاله	$pH۱/۴۵۳ - ^{۰/۵}OC۷/۸۶۳\ Clay + ۰/۳۲ + ۱۵/۵۲۴$	۰/۵۱۲	−۰/۰۶۴۶	۶/۵۳۲۶	۵۹/۳۴
۲	Bell و van Keulen (۱۹۹۵)	$Clay۰/۳ + ۴/۸$	۰/۲۷۴	۱۱/۷۳۸۷	۱۴/۱۹۳۲	۱۱/۶۷
۳	Bell و van Keulen (۱۹۹۵)	$OM۰/۳\ Clay + ۰/۲ + ۴/۵۶$	۰/۴۱۵	۱۴/۰۴۴۳	۱۶/۰۶۹۶	۰
۴	Manrique و همکاران (۱۹۹۱)	$OC۵/۲\ Clay + ۰/۲ + ۴/۵۶$	۰/۴۴	۸/۱۶۳۴	۱۰/۷۸۶۳	۳۲/۸۷
۵	Mc Bratney و همکاران (۲۰۰۲)	$Clay\ *\ OC۰/۱۶\ Clay + ۰/۱ + ۶/۹$	۰/۵۰۴	۹/۸۶۱۰	۱۲/۲۶۵۶	۲۳/۶۷
۶	Breeuwsma و همکاران (۱۹۸۶)	$OM۳/۱\ Clay + ۰/۳۲$	۰/۵۰۶	۴/۸۲۹۸	۸/۳۹۰۲	۴۷/۷۸



شکل ۱- مقایسه گنجایش تبادل کاتیونی اندازه گیری شده و برآورده شده داده های آزمونی

فهرست منابع:

۱. احیایی، م. ۱۳۷۶. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک. جلد دوم. موسسه تحقیقات خاک و آب. تهران.

۲. احیایی، م و ع. ا. بهبهانی‌زاده. ۱۳۷۲. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک. جلد اول. موسسه تحقیقات خاک و آب. تهران.

۳. بغدادی، م. ۱۳۷۷. بررسی خاکهای شمال ایران (استان گیلان) طرح تهیه نقشه جامع خاکهای ایران. موسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه فنی شماره ۱۰۴۵.

۴. دوات‌گر، ن.، م. کاووسی، م. ح. علی‌نیا و م. پیکان. ۱۳۸۴. برررسی وضعیت پتاسیم و اثر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بر آن در شالیزارهای استان گیلان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۴:۸۹-۷۱.

۵. کریمیان، ن. ع. ۱۳۷۵. سهم رس و موادآلی در ظرفیت تبادل کاتیونی خاکهای آهکی استان فارس. پنجمین کنگره علوم خاک ایران. کرج. ایران.

۶. محمودی، ش. و م. حکیمیان (مترجمان).۱۳۷۷. مبانی خاکشناسی. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تهران.

۷. میرخانی، ر.، شعبانپور، م. و س. سعادت. ۱۳۸۴. استفاده از فراوانی نسبی ذرات و درصد کربن‌آلی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاکهای استان لرستان. مجله علوم خاک و آب ۱۹:۲۴۲-۲۳۵.

۸. نوربخش، ف.، جلالیان، ا. و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۲. تخمین گنجایش تبادل کاتیونی خاک با استفاده از برخی ویژگیهایی فیزیکوشیمیایی خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۳:۱۱۷-۱۰۷.

9. Amini M., K.C. Abbaspour, H. Khademi, N. Fathianpour, M. Afyuni, and R. Schulin. 2005. Neural Network Models to Predict Cation Exchange Capacity in Arid Regions of Iran. Eur. J. Soil Sci.. 56:551-559.
10. Bell, M.A., and H. van Keulen. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 865-871.
11. Breeuwsma, A., J.H.M. Wosten, J.J. Vleeshouwer, A.M. van Slobbe, and J. Bouma. 1986. Derivation of land qualities to assess environmental problems from soil surveys. Soil Sci. Soc. Am. J. 50:186-190.
12. Horn A. L., R. A. Düring, and S. Gäth. 2005. Comparison of the prediction efficiency of two pedotransfer functions for soil cation-exchange capacity. J. Plant Nutr. and Soil Sci. 168:372-374.
13. Manrique, L.A., Jones, C.A., and P.T. Dyke. 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. Soil Sci. Soc. of Am. J. 50:787-794.
14. McBratney A. B., B. Minasny, S. R. Cattle, and R. W. Vervoort. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma 109:41-73.
15. Miller W. F. 1970. Inter-regional predictability of cation-exchange capacity by multiple regression. Plant and Soil 33:721-725.
16. Pachepsky, Y. A., and W. J. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:1748-1757.
17. Parfitt R.L., D.J. Giltrap, and J.S. Whitton.1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils. Communications in soil sci. and plant analysis USA. Vol. 26, no.910
18. Seybold C. A., R. B. Grossman, and T. G. Reinsch. 2005. Predicting Cation Exchange Capacity for Soil Survey Using Linear Models. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:856-863.
19. Sparks, D. L. 1953.Environmental soil chemistry. Academic Press. Inc. London.
20. Wilding, L. P., and L. R. Dress. 1983. Spatial variability and pedology. pp. 83-116. In: L. P. Wilding, N. E. Smeck and G. F. Hall (Eds.), pedogensis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Elsevier Sci., Pub., North Hollan