

## ایجاد، ارزیابی و مقایسه توابع انتقالی کلاسی و پیوسته برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در چند کلاس بافتی

حبیب خداوردی لو<sup>۱\*</sup> و نوش آفرین حسینی عربلو<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۲)

### چکیده

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) از ویژگی‌های مهم خاک است. اندازه‌گیری مستقیم CEC، به‌ویژه در خاک‌های اریدی سول بدلیل مقادیر بالای کربنات و گچ، دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است. از دیگر سوی، CEC خاک را می‌توان با روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی خاک (PTFs) برآورد نمود. هدف از این مطالعه برآورد CEC با استفاده از توابع انتقالی کلاسی و پیوسته بود. یک مجموعه داده ( $n = 977$ ) پس از گروه‌بندی بر اساس کلاس بافت خاک برای ایجاد توابع استفاده شد. مجموعه مستقل دیگری ( $n = 173$ ) برای ارزیابی اعتبار توابع به‌کار رفت. برای ارزیابی توابع از مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، میانگین خطا ( $ME$ ) و شاخص همخوانی ( $d$ ) استفاده گردید. در هر کلاس بافتی، برتری ( $RI$ ) توابع پیوسته نسبت به توابع کلاسی متناظر ارزیابی شد. توابع پیوسته در کلاس‌های بافتی ریزتر دقیق‌تر از توابع کلاسی بودند. با این حال، در کلاس‌های بافتی درشت‌تر، توابع کلاسی کارآمدتر بودند. با افزایش اندازه نسبی ذرات خاک، خطای برآورد توسط توابع کلاسی کاهش یافت، به‌طوری که مقدار  $RMSE$  در بافت رسی و لوم شنی به ترتیب  $1/55$  و  $3/88$  بود. لذا، بر پایه نتایج این مطالعه، برای برآورد CEC خاک، توابع پیوسته در کلاس‌های بافتی لوم سیلتی و ریزتر و توابع کلاسی در کلاس‌های بافتی لوم و درشت‌تر پیشنهاد می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی پیوسته و کلاسی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کلاس بافتی خاک

۱. علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. گروه علوم خاک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد میانه

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

## مقدمه

روش‌های غیرمستقیم مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های جایگزین اندازه‌گیری مستقیم CEC، برآورد آن با توابع انتقالی خاک (Pedotransfer Functions: PTFs) می‌باشد. PTFها، CEC خاک را با استفاده از داده‌های زودیافت خاک برآورد می‌کنند. فرض اساسی در بیشتر مدل‌های برآوردکننده CEC وجود رابطه‌ای خطی بین CEC خاک با درصد مواد آلی و رس خاک است (۲۱ و ۱۰،۷).

توابع انتقالی کلاسی (Class PTFs) توابعی هستند که به‌طور ساده، میانگینی از ویژگی‌های دیریافت مورد نظر برای هر کلاس بافتی ارائه می‌دهند. اگر داده‌ها مربوط به چند کلاس بافتی باشند و از توزیع نرمال پیروی نکنند، می‌توان با تفکیک داده‌ها در قالب کلاس‌های بافتی جداگانه، ضریب تغییرات موجود در بین داده‌ها را کاهش داد و توزیع داده‌ها را به حالت نرمال درآورد. شماری از این PTFها توسط برخی پژوهشگران (۱۹۸۸) برای برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک به‌دست آمده‌اند. ایجاد این توابع راحت و ارزان است.

توابع انتقالی پیوسته (Continuous PTFs)، ویژگی‌های خاک مانند فراوانی نسبی ذرات، درصد مواد آلی و جرم ویژه ظاهری خاک را به‌عنوان متغیرهای رگرسیونی در نظر می‌گیرند. این توابع، عموماً از طریق روابطی رگرسیونی، ویژگی‌های دیریافت (Costly measured properties) مانند CEC را از روی ویژگی‌های زودیافت (Readily available properties) مانند رس، ماده آلی و غیره به‌دست می‌آورند. جنبه جالب توجه PTFهای پیوسته این است که می‌توان خطای داده‌های به‌دست آمده از آنها را به صورت کمی درآورد. هر چند که ایجاد و استفاده از توابع کلاسی ساده‌تر است، اما عموماً نسبت به توابع پیوسته دقتی کمتر دارند (۱۵).

در سال‌های اخیر توابع انتقالی گوناگونی برای برآورد CEC از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ایجاد شده است (۹، ۲۰، ۲۲ و ۳۲). در بیشتر این مدل‌ها CEC تابعی خطی از مواد آلی و مقدار رس می‌باشد. مک‌دونالد (۲۰) دو معادله برای خاک‌های کبک و آلبرتا در کانادا با استفاده از متغیرهای ماده آلی خاک و رس

ارزیابی و طراحی برنامه‌های مدیریتی نیازمند اطلاعاتی دقیق از ویژگی‌های خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation Exchange Capacity: CEC) است. CEC از جمله ویژگی‌های مهم خاک است که در پایگاه‌های اطلاعاتی-داده‌ای مربوط به خاک (۲۲) و به‌عنوان ورودی در مدل‌های زیست محیطی و خاکشناسی به‌کار می‌رود (۱۷). هم‌چنین، امروزه استفاده از داده‌های قابل اطمینان خاک در مقیاس وسیع، برای طراحی سامانه‌های کاربری اراضی، مدیریت آلودگی‌های خاک و پیش‌بینی تخریب اراضی رو به گسترش است (۲۱).

مقدار CEC بسته به مقدار و نوع رس و ماده آلی و شرایط خاک متغیر است. رس‌ها و مواد آلی خاک به‌دلیل داشتن سطح ویژه زیاد و باردار بودن، نقشی مهم در CEC خاک دارند، به‌طوری که با افزایش مقدار رس و مواد آلی، CEC خاک افزایش می‌یابد. این افزایش بسته به نوع رس و مواد آلی متفاوت است. برای نمونه خاک‌های حاوی رس گروه اسمکتایت نسبت به خاک‌های دارای رس گروه کائولینایت، CEC بیشتری دارند (۳۰). CEC خاک ممکن است در طول زمان تغییر کرده و با فرآیندهای اسیدی شدن و تجزیه مواد آلی کاهش یابد. هم‌چنین به‌دلیل مشکلاتی مانند تغییر pH و قدرت یونی محلول خاک در حین اندازه‌گیری CEC به‌دلیل وجود مقادیر چشمگیر کلئیدهای با بار وابسته به pH مانند اکسیدهای هیدراته آلومینیوم، منگنز، آلفان‌ها و ماده آلی از یک سو (۲۷) و از سوی دیگر مقادیر بالای کربنات کلسیم و گچ موجود در خاک‌های اریدی سول که گستره‌ای وسیع از خاک‌های ایران را شامل می‌شود، منجر به دشوارتر شدن اندازه‌گیری CEC می‌گردد (۱۱ و ۱۳).

با اینکه اطلاع از CEC خاک به‌عنوان ورودی مدل‌های مدیریتی یا شبیه‌سازی فرآیندهای محیطی ضروری است، به‌دلیل تغییرپذیری زمانی- مکانی این ویژگی، اندازه‌گیری مستقیم آن مستلزم صرف وقت و هزینه بالا و استفاده از تجهیزات خاص و تکنسین‌های خبره است. بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از

همگون تر شدن ویژگی های خاک ها شده و در نهایت دقت و صحت توابع انتقالی ایجاد شده برای برآورد CEC را افزایش می دهد (۸ و ۱۲). اهداف این پژوهش، تعیین مهم ترین متغیرهای مستقل در برآورد CEC خاک در کلاس های بافتی مختلف، ایجاد و ارزیابی توابع انتقالی پیوسته و کلاسی برای برآورد CEC خاک در قالب کلاس های بافتی و مقایسه کارایی این دو نوع از توابع بود.

## مواد و روش ها

### ۱. اندازه گیری متغیرها

داده های مورد نیاز ( $n=1150$ ) از بانک اطلاعات آزمایشگاه های شیمی خاک مرکز تحقیقات خاک و آب کرج و مرکز تحقیقات کشاورزی آذربایجان غربی و شرقی استخراج گردید. از این داده ها، تعداد ۹۷۷ داده به عنوان سری آموزشی و برای ایجاد توابع و تعداد ۱۷۳ داده کاملاً مستقل از سری آموزشی به عنوان داده های آزمون و برای ارزیابی اعتبار مدل های ایجاد شده به کار رفت. متغیرهای استفاده شده برای پیش بینی CEC شامل فراوانی نسبی اندازه ذرات، pH و کربن آلی بود. در همه داده ها فراوانی نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری (۱۴)، CEC خاک به روش باور (۱۶) و مقدار کربن آلی خاک از روش والکلی - بلک (۲۳) و pH خاک به وسیله pH متر در عصاره گل اشباع (۲۹) به دست آمده بودند.

### ۲. رگرسیون چند متغیره

اطلاعات مجموعه داده های سری آموزش و آزمون در جدول ۱ و ۲ آمده است. نرمال بودن داده ها با استفاده از نرم افزار Minitab 14 بررسی شد. سپس، برای گزینش متغیرهای برآوردکننده CEC ضریب هم بستگی بین CEC و ویژگی های زود یافت به دست آمد. هم چنین، برای جلوگیری از هم راستایی خطی چندگانه، ضریب هم بستگی بین ویژگی های زود یافت مورد استفاده نیز برای هر کلاس بافتی تعیین شد. گفتنی است استفاده همزمان از متغیرهای مستقلی که هم بستگی بالایی

ارائه داده است. بل و وان کولن (۹) در چهار منطقه از مکزیک توابعی ایجاد کردند که بیش از ۹۶ درصد از تغییرات CEC خاک را به وسیله مقدار رس، مواد آلی و pH خاک تبیین می نمود. کروگ و همکاران (۱۹) از توابع انتقالی برای برآورد CEC خاک های دانمارک به وسیله آنالیزهای رگرسیونی چند متغیره برای ۱۶۴۳ نمونه خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد که ۹۰ درصد از تغییرات می تواند به وسیله استفاده از مقدار رس و مواد آلی به عنوان متغیرهای وابسته توجیه شود، مقدار خطا در این مدل ۱/۹۹ بود. سی بولد و همکاران (۲۸) از ویژگی های مقدار کربن آلی، رس، سیلت و pH خاک برای ایجاد مدل های برآوردکننده CEC خاک استفاده کردند. میرخانی و همکاران (۵) در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک های لرستان ضریب هم بستگی بالایی میان رس، سیلت و کربن آلی با CEC این خاک ها به دست آوردند. معلمی و دوات گر (۳) بیان کردند که CEC بیشترین هم بستگی را با متغیر کربن آلی دارد که می توان اثر کربن آلی بر CEC را به سطح ویژه و گروه های عاملی زیاد آن نسبت داد.

با این وجود، مدل های ایجاد شده برای یک ناحیه ممکن است نتوانند برآوردهایی مناسب برای ناحیه ای دیگر فراهم کنند (۳۱). سالچو و همکاران (۲۶) با انجام پژوهشی در اوهاییوی جنوبی و تفکیک خاک ها در چهار کلاس بافتی، توابعی را از پنج متغیر مستقل (درصد شن، سیلت، رس و ماده آلی و جرم ویژه ظاهری خاک) پایه ریزی کردند و نشان دادند که ارتباط موجود بین این متغیرها در کلاس های مختلف بافت خاک متفاوت بوده و با تفکیک داده ها در قالب کلاس های بافتی هم راستایی چندگانه در بین متغیرهای مستقل به گونه معنی داری کاهش می یابد که به اعتبار معادلات رگرسیونی می افزاید. پاچپسکی و راولس (۲۵) نیز نشان دادند که وقتی خاک ها بر پایه مشابهت در منشا یا خواص که شامل گروه بزرگ، رژیم رطوبتی و حرارتی خاک و کلاس بافتی گروه بندی گردند، صحت مدل های پیش بینی کننده بهبود می یابد.

مطالعات نشان داده است که گروه بندی خاک ها سبب

جدول ۱. آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها در سری آموزش

pH	O.C %	Silt %	Clay %	CEC cmol.kg <sup>-1</sup>	کلاس بافتی
۱۰/۱	۱/۵	۴۷	۶۳	۴۴/۵	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۲	۴۰	۳/۵	کمین
۷/۸	۰/۸	۲۶	۴۹	۲۱/۸	میانگین (n=۱۸۵)
۰/۵	۰/۳	۱۲	۵	۸/۷	انحراف معیار
۱۰/۳	۱/۶	۵۱	۳۹	۳۸/۰	بیشینه
۷/۱	۰/۰	۲۰	۲۴	۹/۴	کمین
۸/۰	۰/۷	۳۸	۳۲	۲۰/۴	میانگین (n=۲۰۱)
۰/۵	۰/۳	۷	۴	۶/۴	انحراف معیار
۸/۸	۱/۴	۶۷	۴۸	۴۳/۱	بیشینه
۶/۵	۰/۱	۴۱	۲۸	۸/۰	کمین
۷/۸	۰/۸	۵۲	۳۵	۲۱/۸	میانگین (n=۱۴۵)
۰/۴	۰/۳	۵	۴	۶/۳	انحراف معیار
۹/۲	۱/۲	۷۰	۳۱	۳۲/۴	بیشینه
۷/۰	۰/۱	۵۰	۸	۲/۸	کمین
۷/۸	۰/۶	۵۸	۲۱	۱۶/۲	میانگین (n=۹۵)
۰/۴	۰/۳	۵	۵	۵/۹	انحراف معیار
۹/۹	۱/۴	۵۰	۲۹	۳۶/۰	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۲۹	۸	۳/۷	کمین
۷/۹	۰/۶	۴۱	۲۲	۱۵/۹	میانگین (n=۱۹۶)
۰/۵	۰/۳	۶	۵	۵/۵	انحراف معیار
۹/۴	۱/۱	۳۹	۲۰	۲۵/۲	بیشینه
۶/۷	۰/۰	۸	۲	۴/۲	کمین
۷/۹	۰/۳	۲۴	۱۲	۱۰/۷	میانگین (n=۱۲۷)
۰/۴	۰/۳	۷	۴	۳/۹	انحراف معیار

با بهترین زیرمجموعه (Best subset regression) و با استفاده از نرم‌افزار Minitab 14 برای کلاس‌های بافتی مورد نظر ایجاد شد. در صورت ایجاد بیش از یک تابع انتقالی برای یک کلاس بافتی، تابعی ارجح‌تر است که دارای صحت بیشتری باشد (۲۴). هم‌چنین بعد از گروه‌بندی خاک‌ها در کلاس‌های بافتی، از میانگین حسابی CEC اندازه‌گیری شده خاک‌ها برای ایجاد

بین آنها وجود دارد، موجب ایجاد همراستایی خطی چندگانه می‌گردد که در ایجاد روابط رگرسیونی باید از آن دوری شود (۱).

پس از نرمال نمودن توزیع داده‌ها، تصحیح همراستایی بین متغیرهای مستقل و گزینش متغیرهایی که با CEC هم‌بستگی معنی‌دار داشتند، توابع انتقالی با استفاده از رگرسیون چند متغیره

جدول ۲. آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک‌ها در سری آزمون

pH	O.C %	Silt %	Clay %	CEC cmol.kg <sup>-1</sup>	کلاس بافتی
۸/۱	۳/۰	۴۰	۶۱	۴۰/۰	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۲۳	۴۰	۱۶/۰	کمینه
۷/۷	۱/۱	۳۵	۵۰	۲۹/۹	میانگین (n=۲۵)
۰/۳	۰/۶	۴	۷	۵/۹	انحراف معیار
۸/۰	۴/۰	۴۸	۳۸	۳۲/۰	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۲۰	۲۱	۱۳/۰	کمینه
۷/۷	۱/۰	۳۶	۳۱	۱۹/۶	میانگین (n=۳۵)
۰/۳	۰/۷	۶	۳	۵/۰	انحراف معیار
۸/۳	۳/۷	۶۲	۳۹	۳۵/۶	بیشینه
۷/۴	۰/۴	۴۴	۲۸	۱۷/۸	کمینه
۷/۸	۱/۶	۵۱	۳۴	۲۶/۵	میانگین (n=۱۹)
۰/۳	۰/۹	۵	۴	۶/۵	انحراف معیار
۸/۶	۲/۶	۷۸	۲۶	۲۵/۵	بیشینه
۶/۷	۰/۳	۵۱	۰	۸/۴	کمینه
۷/۷	۱/۲	۶۳	۱۷	۱۶/۳	میانگین (n=۲۶)
۰/۶	۰/۶	۷	۶	۴/۷	انحراف معیار
۸/۰	۳/۰	۴۵	۲۸	۳۰/۰	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۲۳	۱۴	۷/۰	کمینه
۷/۸	۰/۸	۳۷	۲۱	۱۶/۹	میانگین (n=۳۷)
۰/۲	۰/۵	۶	۴	۶/۰	انحراف معیار
۸/۳	۲/۰	۴۲	۲۷	۲۳/۵	بیشینه
۷/۰	۰/۰	۱۰	۵	۰/۵	کمینه
۷/۸	۰/۴	۲۴	۱۳	۱۴/۲	میانگین (n=۳۱)
۰/۳	۰/۴	۸	۶	۶/۳	انحراف معیار

همخوانی (Index of agreement: *d*) بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شد. *RMSE* خطای مطلق برآوردها را اندازه‌گیری می‌کند در حالی که *ME* مقدار کلی خطای نسبی و شدت بیش برآوردی یا کم برآوردی توابع را نشان می‌دهد. منفی بودن مقدار *ME* نشان می‌دهد که *CEC* برآورد شده کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است، یعنی توابع کم‌برآوردگر هستند. مثبت بودن مقدار *ME* نیز نشان‌دهنده بیشتر بودن مقدار *CEC*

توابع کلاسی در هر کلاس بافتی استفاده شد. چون داده‌ها دارای توزیع نرمال بودند و از نظر مقداری پراکندگی بالایی نداشتند، از میانگین حسابی استفاده شد.

### ۳. ارزیابی توابع انتقالی ایجاد شده

برای ارزیابی دقت و اعتبار توابع ایجاد شده از مجذور میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، میانگین خطا (*ME*) و شاخص

که به ترتیب برای ایجاد و ارزیابی توابع استفاده شدند، به تفکیک برای هر کلاس بافتی در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به جداول ۱ و ۲، در هر کلاس بافتی CEC و هم‌چنین ویژگی‌های زود یافت مورد استفاده پراکندگی مناسبی دارند، لذا تغییرپذیری در هر کلاس بافتی توسط این داده‌ها قابل تبیین است.

هم‌چنین، پراکندگی هر ویژگی در هر کلاس بافتی در داده‌های سری آزمون (جدول ۲)، نسبتاً در محدوده پراکندگی آن ویژگی در سری آموزش (جدول ۱) است، لذا استفاده از داده‌های سری آزمون برای ارزیابی اعتبار توابع ایجاد شده با سری آموزش منجر به برون‌یابی (Extrapolation) نخواهد گردید. به‌طور میانگین، کمترین مقدار کربن آلی در کلاس بافتی لوم شنی است (جدول ۱). احتمالاً کاهش درصد کربن آلی خاک با افزایش درصد شن را می‌توان به سرعت بالای فرآیندهای تجزیه مواد آلی در خاک‌های شنی که تهویه بهتری دارند نسبت داد، در حالی که در خاک‌های ریزبافت، رس‌ها با نگهداری مواد آلی از تجزیه مواد آلی جلوگیری می‌کنند (۶). این امر و افزون بر آن تفاوت در فراوانی رس موجب شده است که بیشترین پراکندگی مقادیر CEC در کلاس بافتی رسی و کمترین آن در کلاس بافتی لوم شنی باشد (جدول ۱).

جدول ۳ ضرایب هم‌بستگی CEC را با متغیرهای زود یافت خاک در کلاس‌های بافتی مختلف نشان می‌دهد. در کلاس بافتی رسی، CEC تنها با متغیر سیلت هم‌بستگی معنی‌دار ( $P \leq 0/001$ ) داشت. عدم هم‌بستگی معنی‌دار CEC با رس در این کلاس بافتی می‌تواند به دلیل وابستگی بیشتر CEC به نوع رس خاک و نه فراوانی آن باشد، زیرا رس‌های ۱:۱ نقشی اندک و غیر متناسب با درصد رس در مقدار CEC خاک دارند. هم‌بستگی مثبت و معنی‌دار ( $P \leq 0/001$ ) CEC با pH در کلاس بافتی لومی نشان‌دهنده وجود بارهای وابسته به pH در خاک است، به‌طوری که با افزایش pH، مقدار بارهای منفی و لذا CEC افزایش می‌یابد. هم‌بستگی مثبت و معنی‌دار CEC با رس و کربن آلی نیز به دلیل مشارکت آنها در ایجاد بارهای منفی و پدیده تبادل کاتیونی است که در مطالعات بسیاری از

برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری شده یا بیش‌برآوردی توابع است. به دلیل ناکارآمدی‌های معمول ضریب تبیین ( $R^2$ ) (۱۸) از شاخص  $d$  به جای آن استفاده شد. برخلاف  $R^2$  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 (۱۸). این معیارها به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad [1]$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)}{n} \quad [2]$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n [|(p_i - \bar{o})| + |(o_i - \bar{o})|]^2} \right] \quad [3]$$

که در اینجا  $P_i$  مقادیر برآورده شده CEC،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده CEC توسط توابع انتقالی،  $\bar{o}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

با توجه به معادلات بالا، در حالت آرمانی (یعنی وقتی که مقادیر برآورد شده کاملاً برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده باشند)، مقدار  $RMSE$ ،  $ME$  و  $d$  به ترتیب برابر با صفر، صفر و یک خواهد بود. در این پژوهش، از بین توابع ایجاد شده برای هر کلاس بافتی، بهترین تابع به گونه‌ای انتخاب شد که پایین‌ترین مقدار  $RMSE$  و  $ME$  و بیشترین مقدار  $d$  را داشته باشد.

هم‌چنین، با استفاده از مقدار  $RMSE$  مرحله آزمون اعتبار توابع، درصد برتری نسبی ( $RI$ ) توابع انتقالی پیوسته نسبت به توابع کلاسی در هر کلاس بافتی محاسبه شد:

$$RI = \frac{RMSE_{class} - RMSE_{continuous}}{RMSE_{class}} \times 100 \quad [4]$$

که در آن،  $RMSE_{class}$  و  $RMSE_{continuous}$  به ترتیب مقادیر  $RMSE$  توابع کلاسی و پیوسته در هر کلاس بافتی هستند.

## نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های مجموعه داده‌های سری آموزش و آزمون

جدول ۳. ضرایب همبستگی CEC با متغیرهای زود یافت خاک در کلاس‌های بافتی

کلاس بافتی	Clay	Silt	O.C	pH
رسی	۰/۱۱ <sup>n.s</sup>	۰/۵۰ <sup>***</sup>	۰/۰۹ <sup>n.s</sup>	۰/۱۳ <sup>n.s</sup>
لوم رسی	۰/۳۰ <sup>***</sup>	۰/۰۳ <sup>n.s</sup>	۰/۲۵ <sup>***</sup>	۰/۱ <sup>n.s</sup>
لوم رسی سیلتی	۰/۲۰ <sup>*</sup>	۰/۱۳ <sup>n.s</sup>	۰/۲۸ <sup>***</sup>	۰/۱۰ <sup>n.s</sup>
لوم سیلتی	۰/۴۲ <sup>***</sup>	۰/۰۰ <sup>n.s</sup>	۰/۴۳ <sup>***</sup>	۰/۰۱ <sup>n.s</sup>
لوم	۰/۲۳ <sup>**</sup>	۰/۰۸ <sup>n.s</sup>	۰/۱۴ <sup>n.s</sup>	۰/۲۰ <sup>**</sup>
لوم شنی	۰/۱۷ <sup>n.s</sup>	۰/۱۱ <sup>n.s</sup>	۰/۱۴ <sup>n.s</sup>	۰/۰۲ <sup>n.s</sup>

\*\*\*, \*\*, \*, n.s: به ترتیب معنی دار در سطح  $p \leq 0/05$ ,  $p \leq 0/01$ ,  $p \leq 0/001$  و غیر معنی دار در سطوح یاد شده.

ME متعلق به کلاس بافتی رسی است (جدول ۴)، احتمالاً عواملی دیگر به غیر از ویژگی‌های زود یافت مورد استفاده در این مطالعه بر CEC مؤثر بوده و یا آن‌که شکل‌هایی پیچیده‌تر از روابط خطی و برهم کنش متغیرهای مستقل بر کمیت CEC تأثیر داشته باشند (۲). کمترین مقدار *RMSE* و *ME* در توابع کلاسی مربوط به کلاس بافتی لوم شنی و در توابع پیوسته متعلق به کلاس بافتی لوم سیلتی بود (جدول ۴). در مقایسه *RMSE* مربوط به مراحل آموزش و آزمون توابع کلاسی بیشترین اختلاف مربوط به کلاس بافتی لوم شنی، و در توابع پیوسته مربوط به کلاس بافتی لومی بود، که ناشی از دقت پایین این توابع می‌باشد. در توابع ایجاد شده برای کلاس‌های بافتی لوم رسی، لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی، درصد رس و کربن آلی بیشترین تأثیر را داشتند (جدول ۴).

نوربخش و همکاران (۶)، مهاجر و همکاران (۴) و مانریکو و همکاران (۲۲) نیز دریافته‌اند که کاربرد توأمان رس و کربن آلی به‌عنوان متغیرهای ورودی منجر به برآوردی مناسب‌تر از CEC خاک می‌شود. در توابع ایجاد شده برای این کلاس‌های بافتی، ضریب کربن آلی به مراتب بیشتر از ضریب رس بوده (در کلاس بافتی لوم رسی ۹ برابر، لوم رسی سیلتی ۲۳ برابر و لوم سیلتی ۱۷ برابر) و این تفاوت در توابع کلاس بافتی لوم سیلتی به بیشترین مقدار خود رسید، به‌طوری که در کلاس

پژوهشگران به آن اشاره شده است (۶، ۹ و ۲۲). در کلاس بافتی لوم شنی CEC با هیچ کدام از ویژگی‌های زود یافت همبستگی معنی دار ( $P \leq 0/05$ ) نداشت.

جدول ۴ PTF‌های کلاسی و پیوسته ایجاد شده برای برآورد CEC خاک‌ها را برای هر کلاس بافتی نشان می‌دهد. مقایسه آماره‌های ارزیابی *ME*، *RMSE* و *d* برای کلاس‌های بافتی مختلف در توابع کلاسی و پیوسته نشان داد که مقدار این آماره‌ها برای داده‌های آموزشی، اختلاف ناچیزی با داده‌های آزمون دارد (جدول ۴). این نتایج نشان داد که در این پژوهش ارتباط نزدیکی میان دقت و اعتبار توابع انتقالی ایجاد شده وجود داشت. با این حال، پاچسکی و همکاران (۲۴) نشان دادند که در تخمین رطوبت حجمی، رابطه‌ای نزدیک بین نتایج آزمون دقت و اعتبار توابع انتقالی ایجاد شده نداشت. این ناهمخوانی در نتایج را می‌توان چنین توجیه نمود که CEC خاک عموماً به مقدار و نوع رس و مواد آلی خاک وابسته است که در یک منطقه، تغییرپذیری بالایی ندارند. در حالی که، رطوبت خاک به‌شدت به هندسه منافذ خاک وابسته است که تغییرپذیری مکانی بالایی دارد. لذا، آزمون اعتبار توابع انتقالی CEC با یک سری از داده‌های مستقل، منجر به نتایجی متفاوت‌تر از آزمون دقت (همانند آنچه برای رطوبت حجمی رخ می‌دهد) نخواهد شد. در PTF‌های کلاسی و پیوسته بیشترین مقدار *RMSE* و

جدول ۴. توابع انتقالی کلاسی و پیوسته ایجاد شده برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک، دقت و اعتبار توابع و برتری نسبی (RI) توابع پیوسته نسبت به توابع کلاسی<sup>a</sup> برای هر کلاس بافتی

کلاس بافتی	نوع تابع	توابع انتقالی ایجاد شده	مرحله آزمون دقت			مرحله آزمون اعتبار				
			ME <sup>b</sup>	RMSE <sup>b</sup>	d	تعداد داده	ME	RMSE	d	RI (%)
رسی (n= ۱۸۵)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۲۱/۷۱	۰/۰۰	۸/۵۵	۰/۰۰	(n=۲۵)	-۸/۲۲	۱۰/۰۶	۰/۴۴	-
	پیوسته	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۱۲/۱ + ۰/۳۷۴ Silt%	۰/۳۳	۷/۷۳	۰/۵۹		-۴/۷۷	۷/۹۸	۰/۴۰	۲۰/۷
لوم رسی (n= ۲۰۱)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۲۰/۴۵	۰/۰۰	۶/۴۲	۰/۰۰	(n=۳۵)	۰/۸۵	۵/۰۰	۰/۲۱	-
	پیوسته	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۱/۱۱ + ۰/۵۰۵ Clay% + ۴/۴۰ O.C %	۰/۰۶	۵/۹۳	۰/۵۱		۱/۴۱	۴/۵۲	۰/۶۷	۹/۶
لوم رسی سیلتی (n= ۱۴۵)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۲۱/۶۸	۰/۰۰	۶/۷۲	۰/۰۰	(n=۱۹)	-۴/۷۷	۷/۸۹	۰/۴۷	-
	پیوسته	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۷/۳۲ + ۰/۲۶۹ Clay % + ۶/۳۱ O.C %	۰/۱۶	۶/۱۵	۰/۴۹		-۰/۰۷	۶/۸۸	۰/۶۵	۸/۱۲
لوم سیلتی (n= ۹۵)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۱۶/۸۶	۰/۰۰	۶/۵۳	۰/۰۰	(n=۲۶)	۰/۵۶	۴/۶۰	۰/۱۷	-
	پیوسته	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۳/۱۴ + ۰/۴۱۹ Clay % + ۷/۰۶ O.C%	۰/۰۵	۵/۱۱	۰/۷۵		۲/۴۵	۴/۱۹	۰/۸۳	۸/۹
لوم (n= ۱۹۶)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۱۵/۹۴	۰/۰۰	۵/۴۷	۰/۰۰	(n=۳۷)	-۱/۰۲	۶/۰۳	۰/۲۲	-
	پیوسته	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = -۶/۱۵ + ۰/۲۶۸ Clay% + ۲/۰۴ pH	-۰/۰۳	۵/۲۲	۰/۳۹		-۳/۲۷	۸/۳۵	۰/۳۵	-۳۸/۵
لوم شنی (n= ۱۲۷)	کلاسی	CEC(cmole.kg <sup>-1</sup> ) = ۱۰/۶۵	۰/۰۰	۳/۸۸	۰/۰۰	(n=۳۱)	-۳/۳۹	۷/۰۸	۰/۴۲	-
	پیوسته	به دلیل عدم هم بستگی با CEC و ویژگی های خاک، تابعی ایجاد نشد.	-	-	-		-	-	-	-

a: برای اطلاع از مفهوم شاخص های  $ME$ ،  $RMSE$ ،  $d$  و  $RI$  به روابط ۱ تا ۴ در بخش مواد و روش ها مراجعه شود؛<sup>b</sup>: واحد  $ME$  و  $RMSE$  معادل واحد CEC یعنی  $\text{cmole.kg}^{-1}$  است؛<sup>c</sup>: در توابع کلاسی چون مقدار برآورد شده CEC برای هر خاک در واقع میانگین مقادیر اندازه گیری شده در آن کلاس بافتی است، لذا مقادیر  $ME$  برابر با صفر است.

و کاهش اثر آن بر CEC ذکر کردند، با تجزیه موادالی در خاک درجه هوموسی شدن موادالی و گروه های اسیدی افزایش یافته، و CEC خاک افزایش می یابد.

وگنر و همکاران (۳۱) نیز برای خاک های مناطق شمالی آلمان، توابعی برای کلاس های بافتی مختلف ارائه کردند که نتایج نشان داد توابع ایجاد شده برای برآورد CEC خاک های سیلتی دقتی به مراتب بیشتر از دیگر کلاس های بافتی دارند و با افزایش رس و شن، ناکارآمدی توابع افزایش می یابد. معلمی و

بافتی لوم سیلتی، افزایش یک درصدی کربن آلی سبب افزایش ۷/۰۶ واحدی CEC خاک می شود (جدول ۴). در نتایج مانریکو و همکاران (۲۲) ضریب ماده آلی نسبت به ضریب رس در توابع ایجاد شده در حدود ۲۰ برابر بود که آن را به غالب بودن اسید فولویک در ترکیبات آلی خاک ها به خاطر داشتن گروه های کربوکسیل بیشتر نسبت به اسید هومیک نسبت دادند. بل و کولن (۹) در توابع خود ضریب رس را بیشتر از ضریب ماده آلی به دست آوردند و دلیل آن را سرعت تجزیه بسیار کم مواد آلی



نشان‌دهنده برتری تابع کلاسی به پیوسته است. به‌طور کلی، برتری توابع پیوسته در کلاس‌های ریزبافت بیشتر بود که می‌توان دلیل آن را تغییرپذیری بیشتر ویژگی‌های مؤثر بر CEC خاک (مانند رس و مواد آلی) در کلاس‌های بافتی ریزتر و ناتوانی توابع کلاسی در تبیین این تغییرپذیری‌ها دانست.

### نتیجه‌گیری

مقایسه توابع انتقالی کلاسی و پیوسته ایجاد شده برای کلاس‌های بافتی مختلف نشان‌دهنده کارایی نسبتاً یکسان و مناسب توابع انتقالی کلاسی و پیوسته در برآورد CEC خاک‌های مورد مطالعه بود. گفتنی است برآورد CEC با استفاده از توابع ایجاد شده هرگز نمی‌تواند به‌طور کامل جایگزین اندازه‌گیری CEC خاک شود. 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 آزموده شود. در صورتی که داده‌های مربوط به خواص اثرگذار بر برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی مانند نوع کانی رس در بانک داده‌ها وجود داشته باشد به احتمال زیاد دقت و صحت معادلات برآوردکننده بهبود می‌یابد.

داوت‌گر (۳) نیز توابعی برای کلاس‌های بافتی مختلف ارائه کردند که فقط برای کلاس‌های بافتی لومی و لوم رسی شنی منجر به افزایش  $R^2$  و کاهش  $RMSE$  و در نتیجه بهبود در برآورد CEC شد که می‌تواند به دلیل همگونی نمونه خاک‌ها از نظر منشأ و نوع کانی‌های رسی بیشتر باشد. سالچو و همکاران (۲۶) برای خاک‌های آبرفتی اوهایوی جنوبی پس از گروه‌بندی خاک‌ها در چهار کلاس بافتی، توابعی پیوسته پایه‌ریزی کردند و نشان دادند که روابط بین ویژگی‌های خاک و کارایی توابع انتقالی ایجاد شده در کلاس‌های مختلف بافت خاک، متفاوت است. همچنین، این پژوهشگران نشان دادند که توزیع مجموعه داده‌ها با تفکیک آنها در قالب کلاس‌های بافتی به توزیع نرمال نزدیک‌تر شده و همراستایی چندگانه در بین متغیرهای مستقل به گونه‌ای معنی‌داری کاهش می‌یابد که نهایتاً این دو عامل، اعتبار توابع انتقالی را می‌افزاید. آنها در پایان گزارش کردند که داده‌های برآوردی این PTFها، انطباق قابل قبولی با داده‌های مشاهده شده داشته‌اند (۲۶).

شاخص  $RI$  که معیاری از برتری تابع پیوسته رگرسیونی نسبت به تابع کلاسی در هر کلاس بافتی است به ترتیب در توابع ایجاد شده برای کلاس‌های بافتی رسی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی برابر  $0.20/7$ ،  $0.09/6$ ،  $0.12/8$  و  $0.8/9$  (جدول ۴)، ولی برای کلاس بافتی لومی این مقدار منفی بود که

### منابع مورد استفاده

۱. خداوردی‌لو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۱. اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۳(۱۰): ۳۵-۴۷.
۲. معلمی، س.، ن. داوت‌گر و ف. دریغ‌گفتار. ۱۳۸۸. رابطه بین گنجایش تبادل کاتیونی و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در خاک‌های گیلان. مجله پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک) ۲: ۱۷۳-۱۷۹.
۳. معلمی، س. و ن. داوت‌گر. ۱۳۹۰. مقایسه توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی در برآورد گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌های گیلان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک) ۵۵: ۱۶۹-۱۸۱.
۴. مهاجر، ر.، م. ح. صالحی و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۸۸. تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از رگرسیون و شبکه عصبی و اثر تفکیک داده‌ها بر دقت و صحت توابع. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی) ۴۹: ۸۳-۹۷.
۵. میرخانی، ر.، م. شعبانپور و س. سعادت. ۱۳۸۴. محاسبه ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از بافت خاک و درصد ماده آلی

خاک در خاک های استان گلستان، مجله علوم آب و خاک ۱۹(۲): ۲۳۵-۲۴۲.

۶. نوربخش، ف.، ا. جلالیان و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۲. تخمین گنجایش تبادل کاتیونی خاک با استفاده از برخی ویژگی های

فیزیکوشیمیایی خاک، علوم فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۳: ۱۰۷-۱۱۷.

7. Amini, M., K. C. Abbaspour, H. Khademi, N. Fathianpour, M. Afyuni and R. Schuln. 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid region of Iran. *Eur. J. Soil Sci.* 56:551-559.
8. Asadu, C. L. A. and F. O. R. Akamigbo. 1990. Relative contribution of organic matter and clay fraction to cation exchange capacity of soil in southern Nigeria. *Samaru J. Agric. Res.* 7:17-23.
9. Bell, M. A. and H. van Keulen. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59: 865-871.
10. 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. Amer. J.* 50:186-190.
11. Carpena, O., A. Lux and K. Vahtras. 1972. Determination of exchangeable cation in calcareous soils. *Soil Sci.* 33: 194-199.
12. Drake, E. H. and H. L. Motto. 1982. An Analysis of the effect of clay and organic matter content on cation exchange capacity of New Jersey soil. *Soil Sci.* 133(5):281-288.
13. Fernando, M. J., R. G. Burau and K. Arulanandam. 1977. A new approach to determination of cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41:818-820.
14. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. PP. 383-411. *In: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Agronomy Handbook No 9, American Society of Agronomy and Soil Sci. Soc. Amer. Madison, WI.*
15. Ghorbani Dashtaki, SH., M. Homaei and H. Khodaverdiloo. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use Manage.* 26:68-74.
16. Hesse, P. R. 1971. *A text Book of Soil Chemical Analysis.* John Marry Ltd., London.
17. Keller, A., B. Von Stiger, S.T. Van der Zee and R. Schuln. 2001. A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 30:1976-1989.
18. Khodaverdiloo, H., M. Homaei, M. TH. Van Genuchten and SH. Ghorbani Dashtaki. 2011. Deriving and Validating Pedotransfer Functions for some Calcareous Soils. *J. Hydrol.* 399:93-99.
19. Krogh, L., H. Breuning and M. H. Greve. 2000. Cation exchange capacity pedotransfer function for Danish soils. *Soil Plant Sci.* 50:1-12.
20. MacDonald, K. B. 1998. Development of pedotransfer functions of southern Ontario soils Report from. greenhouse and processing crops research center. Harrow, Ontario. No: 01686-8-0436:1-23.
21. McBratney, A. B., B. Minasny, S. R. Cattle and R. W. Vervoort. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109:41-73.
22. Manrique, L. A., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50:787-794.
23. Nelson, D. W. and L. P. Sommers. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. PP.539-579. *In: A. L. Page(Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Agronomy Handbook No 9, American Society of Agronomy and Soil Sci. Soc. Amer. Madison, WI.*
24. Pachepsky, Ya. A., D. Timlin and G. Varallyay. 1996. Artificial Neural Networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 60:727-733.
25. Pachepsky, Ya. A., and W. J. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 60:727-733.
26. Salchow, E., R. Lal, N. R. Fausey and A. Ward. 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. *Geoderma.* 73:165-181.
27. Sayegh A. H., N. A. Khan, P. Khan and J. Ryan. 1978. Factors affecting gypsum and CEC determinations in gypsiferous soils. *Soil Sci.* 125(5):294-300.
28. Seybold, C. A., R. B. Grossman and T. G. Reinsch. 2005. Predicting Cation Exchange Capacity for Soil Survey Using Linear Models. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 69:856-86.
29. Soil Survey Staff, 1996. *Soil Survey laboratory methods manual.* Soil Survey Investigation Rep. 42. Version 3. 0. U. S. Gov. Print. Washington, DC.
30. Sparks, D. L. 1995. *Environmental Soil Chemistry.* Academic Press Inc. University of Delaware. London.
31. Wagner, B., V. Hennings, U. Muller, G. Wessolek and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102:275-279.
32. Wosten J. H. M., Y. A. Pachepsky and W. J. Rawls. 2001. Pedotransfer function: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251:123-150.