

اشتقاق و ارزیابی تابع انتقالی طیفی و تابع انتقالی خاک به منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی

صلاح الدین کریمی، مسعود داوری¹ و ابراهیم بابائیان

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران؛ Salahkaarimi@yahoo.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران؛ m.davari@uok.ac.ir

دکتری، گروه آب، خاک و محیط زیست، دانشگاه آریزونا، امریکا؛ ebabaeian@email.arizona.edu

دریافت: 95/10/1 و پذیرش: 96/7/12

چکیده

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک است که در حاصلخیزی خاک و مدیریت کیفیت آن اهمیت بسیاری دارد. اندازه‌گیری CEC به روش مستقیم دشوار، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد داده‌های طیفی خاک در مقایسه با ویژگی‌های مبنایی خاک به‌عنوان متغیرهای ورودی توابع انتقالی در برآورد CEC خاک می‌باشد. بدین منظور، تعداد 120 نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری گردید. سپس CEC و برخی از ویژگی‌های زودپافت خاک‌ها در آزمایشگاه با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. همچنین رفتار طیفی خاک‌های مورد مطالعه نیز با دستگاه طیف‌سنجی انعکاسی زمینی در دامنه 2500 - 350 نانومتر تعیین شد. پس از ترسیم منحنی‌های انعکاس طیفی و استخراج داده‌های طیفی، برخی از روش‌های پیش‌پردازش طیفی مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام، ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز برخی از ویژگی‌های مبنایی خاک برآورد شدند. سه سناریو تابع انتقالی شامل تابع انتقالی طیفی (STF)، تابع انتقالی خاک (PTF) و تابع انتقالی مرکب (SPTF) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. بر پایه نتایج، STF در مقایسه با دیگر توابع انتقالی، دارای صحت بالاتری (RPD = 1/50، RMSE = 2/57 cmolc/kg) در برآورد CEC خاک بود. در این میان، PTF (RPD = 1/09، RMSE = 3/55 cmolc/kg) و SPTF (RPD = 0/95، RMSE = 4/06 cmolc/kg) از صحت پایین‌تری برخوردار بودند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد داده‌های طیفی خاک می‌توانند به‌عنوان روشی غیرمستقیم، ساده، سریع و کارآمد در برآورد CEC خاک مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی خاک، رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام، منحنی حذف پیوستار، ویژگی‌های زودپافت

خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

مقدمه

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)¹ بیشینه‌ی مقدار کاتیونی است که وزن معینی از خاک می‌تواند جذب سطحی یا نگهداری نماید. این ویژگی در جذب سطحی و رهاسازی عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان و همچنین ارزیابی پتانسیل بالقوه خطر آلاینده‌های معدنی و برخی آلاینده‌های آلی کاتیونی نقشی مؤثر دارد (هزار جریبی و همکاران، 1392). مقدار CEC بسته به میزان مواد آلی، مقدار و نوع رس و شرایط خاک متغیر می‌باشد. رس‌ها و مواد آلی خاک به دلیل دارا بودن سطح ویژه زیاد و داشتن بارهای عمدتاً منفی نقشی مهم در افزایش CEC خاک دارند. واکنش خاک نیز در خاک‌های دارای بار وابسته به pH می‌تواند در مقدار CEC خاک مؤثر باشد. دامنه تغییرات CEC از کمتر از یک سانتی‌مول بار بر کیلوگرم برای خاک‌های شنی دارای مواد آلی کم تا بیش از 25 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم برای خاک‌های رسی دارای مواد آلی زیاد متغیر می‌باشد (میرخانی و همکاران، 1384). برای تعیین CEC خاک روش‌های مختلفی وجود دارد. رایج‌ترین روش اندازه‌گیری CEC در ایران به روش باور موسوم بوده، که خود شامل شست‌وشوی خاک با استات سدیم، خارج کردن نمک‌های محلول با الکل اتیلیک و سپس اندازه‌گیری سدیم بدست آمده از شست‌وشو با استات آمونیوم است. شایان ذکر است که تمامی روش‌های اندازه‌گیری CEC دشوار، زمان‌بر و معمولاً پرهزینه می‌باشند (کلر و همکاران، 2001).

افزون بر این، اندازه‌گیری CEC در خاک‌های اریدی‌سول، که گستره‌ای وسیع از خاک‌های ایران را شامل می‌شود، به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد کربنات کلسیم و گچ بسیار دشوار می‌باشد. بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیرمستقیم مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از روش‌های جایگزین اندازه‌گیری مستقیم CEC، برآورد آن با توابع انتقالی خاک (PTF²) می‌باشد. PTF ها، CEC خاک را با استفاده از داده‌های زودیافت خاک برآورد می‌کنند. فرض اصلی در بیشتر PTF‌های تخمین‌گر CEC، وجود رابطه خطی بین ویژگی موردنظر با مقدار رس و ماده آلی خاک می‌باشد (مک-برانتسی و همکاران، 2002؛ امینی و همکاران، 2005). کروگ و همکاران (2000) نشان دادند که استفاده از ویژگی‌های زودیافت رس و مواد آلی می‌تواند 90 درصد از تغییرات CEC خاک را تبیین کند. سی‌بولد و همکاران

(2008) نیز از ویژگی‌هایی همچون مقدار کربن آلی، رس، سیلت و pH خاک برای ایجاد توابع انتقالی برآورد کننده CEC خاک استفاده کردند. تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (1394) در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، ضریب همبستگی بالایی بین ویژگی‌های رس و ماده آلی خاک به‌دست آوردند. هزارجریبی و همکاران (1392) نیز مدلی را با پارامترهای ورودی رس، سیلت، شن، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی کننده CEC خاک پیشنهاد کردند. بررسی‌های انجام شده راجع به توابع انتقالی خاک نشان می‌دهد علی‌رغم توسعه روش‌های مختلف مدل‌سازی (همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون‌های چندگانه یا درختی)، هنوز این توابع با محدودیت‌هایی همچون وابستگی به نوع و میزان دقت روش‌های اندازه‌گیری، دقت آزمایش‌گر، وابستگی به شرایط زمانی، در نظر نگرفتن ویژگی‌هایی همچون ساختمان و کانی‌شناسی رس، عدم وجود اطلاعات جانبی (همچون شرایط نمونه‌برداری، وضعیت پوشش گیاهی و سطح زمین) و همچنین عدم کارایی بالا در دیگر مناطق مواجه می‌باشند (وریکن و همکاران، 2010).

طی دو دهه گذشته، از اطلاعات طیفی خاک در دامنه‌های مرئی (Vis³)، مادون قرمز نزدیک (NIR⁴) و مادون قرمز میانی (SWIR⁵) (طول‌موج‌های بین 350 تا 2500 نانومتر) به‌عنوان روشی جایگزین برای برآورد برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده است (جانیک و همکاران، 2009). این روش‌ها غیر-مخرب، سریع و کارآمد بوده و در استفاده از آن‌ها یکپارچگی اولیه سیستم خاک حفظ می‌شود. افزون بر این، طیف‌سنجی و به‌ویژه طیف‌سنجی مادون‌قرمز، امکان مشخص کردن اجزای مختلف خاک را نیز فراهم می‌کند. در پژوهش‌های گذشته از روش‌های طیف‌سنجی مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی به‌منظور تعیین برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک استفاده شده است. اسلام و همکاران (2003)، با استفاده از بازتاب طیفی در گستره فرابنفش، مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (2500-250 نانومتر) و روش رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR⁶) مقدار CEC خاک را با ضریب تبیین (R²) معادل با 0/64 برآورد کردند. در پژوهش دیگری نیز شرفرد و والاش (2002)، مقدار CEC خاک را با استفاده از بازتاب طیفی

3. Visible

4. Near infrared

5. Short wave infrared

6. Principal component regression

1. Cation exchange capacity

2. Pedotransfer functions

مواد و روش‌ها

این مطالعه در بخشی از اراضی کشاورزی شهرستان-های قروه و دهگلان واقع در استان کردستان انجام شد (شکل 1). منطقه مورد مطالعه از نظر موقعیت جغرافیایی در حد فاصل "35°03'34" تا "35°15'30" عرض شمالی و "47°19'57" تا "45°42'23" طول شرقی قرار دارد. ارتفاع متوسط این منطقه از سطح دریا معادل 1550 متر است. بیشینه و کمینه درجه حرارت سالانه به ترتیب 40/5 و 30- درجه سانتی‌گراد بوده و متوسط بارندگی سالانه نیز 352 میلی‌متر می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه به ترتیب زیریک و مزیک است. غالب خاک‌های منطقه نیز رسی و لوم رسی بوده و در زیر گروه‌های Typic Calcixerepts, Typic Haploxerepts و Vertic Calcixerepts واقع شده است.

تعداد 120 نمونه خاک دست‌خورده از عمق 0-15 سانتی‌متری منطقه مورد مطالعه به صورت تصادفی برداشت شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند. پس از آماده‌سازی این نمونه‌ها، توزیع اندازه ذرات خاک با روش هیدرومتری، جرم ویژه ظاهری با روش کلوخه، مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی-بلاک، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک نیم نرمال برای خنثی‌سازی کربنات کلسیم در آن و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک نیز به روش باور اندازه‌گیری شد. واکنش خاک (pH) و رسانایی الکتریکی (EC) نیز به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های pH متر و هدایت‌سنج در نسبت 1:2 سوسپاسیون آب به خاک اندازه‌گیری شد (کلوت، 1986؛ پیچ و همکاران، 1982). برای محاسبه میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک نیز از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما استفاده شد (شیرازی و بورسما، 1984).

در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (2500-350 نانومتر) و روش اسپلاین رگرسیونی تطبیقی چند متغیره (MARS¹) پیش‌بینی کردند. این محققین ضریب تبیین (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده-های اندازه‌گیری و برآورد شده را به ترتیب معادل 0/64 و 38 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم گزارش کردند. این نتایج می‌تواند بیان‌گر این واقعیت باشد که استفاده از اطلاعات طیفی خاک می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های توابع انتقالی خاک را برطرف نماید. زیرا در رویکرد طیفی، متغیرهای ورودی توابع انتقالی تنها داده‌های طیفی خاک بوده که بر خلاف داده‌های زودیافت خاک، تنها با یک روش استاندارد و در یک مرحله اندازه‌گیری می‌شوند. لذا خطای ناشی از تنوع روش‌های اندازه‌گیری و شخص کاربر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، رویکرد طیفی روشی غیرمخرب و بسیار سریع بوده که در صورت توسعه آن از طریق داده‌های ماهواره‌ای، امکان استفاده در مقیاس‌های بزرگ را داشته و می‌تواند تغییرپذیری زمانی خاک را نیز مدنظر قرار دهد (بابائیان و همکاران، 2015 a,b).

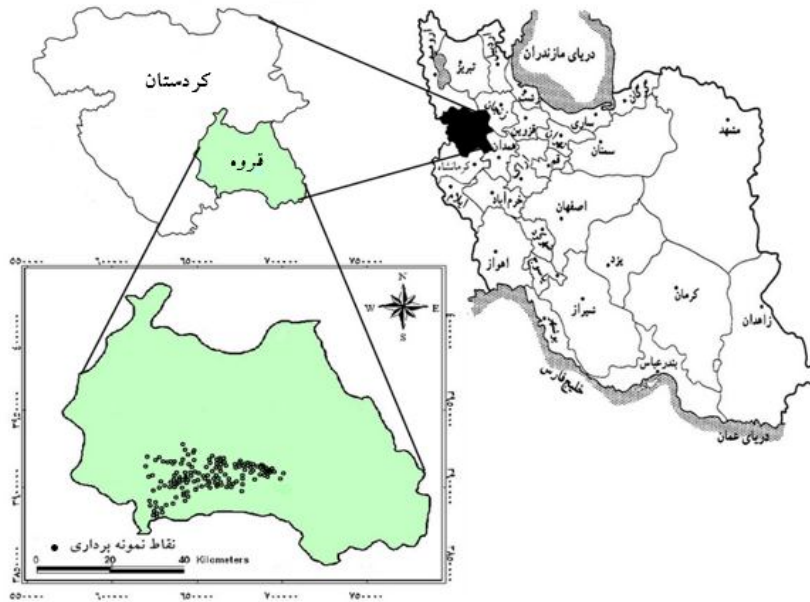
به‌منظور یافتن پاسخ این مسأله که آیا استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی می‌تواند به‌طور مؤثری باعث افزایش کارایی برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شود، سه سناریو مورد ارزیابی قرار گرفت. این سناریوها شامل: 1) اشتقاق توابع انتقالی طیفی (STF²) با استفاده مستقیم از داده‌های طیفی خاک برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، 2) اشتقاق توابع انتقالی خاک (PTF³) با بهره‌گیری از برخی ویژگی‌های زود یافت خاک، 3) اشتقاق توابع انتقالی مرکب (SPTF⁴) با استفاده از برآورد ویژگی‌های زود یافت خاک از داده‌های طیفی در مرحله اول و سپس استفاده از ویژگی‌های برآورد شده به‌عنوان ورودی توابع انتقالی خاک، می‌باشند. از آنجا که راجع به استفاده از داده‌های طیفی در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تاکنون در ایران مطالعه‌ای انجام نشده است؛ هدف از این پژوهش اشتقاق و اعتبارسنجی STF، PTF و SPTF به‌منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و ارزیابی عملکرد داده‌های طیفی در مقایسه با ویژگی‌های زود یافت خاک به‌منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی بود.

¹ Multivariate adaptive regression splines

² Spectrotransfer functions

³ Pedotransfer functions

⁴ Spectropedotransfer functions



شکل 1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری در دشت‌های کشاورزی شهرستان‌های قروه - دهگلان، استان کردستان

سیس این منحنی‌های طیفی برداشت شده به شکل کتابخانه‌های طیفی و فایل متنی ذخیره شده و در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. هر منحنی طیفی ثبت شده دارای تفکیک طیفی یک نانومتر بود؛ به گونه‌ای که گستره 2450-400 نانومتر هر منحنی طیفی شامل 2050 بازتاب طیفی بود.

به منظور حذف تأثیر عوامل ناخواسته خارجی همچون رطوبت خاک، زبری سطح خاک، بقایای درشت آلی، آلودگی پیستول به گرد و غبار و همچنین استفاده بهینه از داده‌های طیفی طی فرآیند تخمین، پیش‌پردازش داده‌های طیفی انجام شد. از آنجایی که در طول موج‌های 399-350 و 2500-2451 نانومتر آشفتگی‌های طیفی (نویز) زیادی وجود دارد، هر دو محدوده از تمامی طیف‌ها حذف شده و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگیرد (گومز و همکاران، 2008). همچنین، به منظور حذف آشفتگی در طیف‌های خاک (همچون رفتار غیرخطی باندها، نرمال‌سازی طیف‌ها، فیلتر و بارز سازی طیفی) و ارتقای کیفیت داده‌ها، روش‌های مختلف پیش‌پردازش بر روی داده‌های طیفی با استفاده از نرم‌افزارهای ParleS 3.1 و Unschambler X 10.3 انجام شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش از انواع مختلف روش‌های پیش‌پردازش همچون فیلتر میانه، فیلتر ساویتزکی و گلای (Savitzky - Golay)، نرمال‌سازی بر اساس میانگین،

بازتاب طیفی نمونه خاک‌های مورد مطالعه نیز با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر زمینی (FieldSpec@3, ASD, FR, USA) گروه خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری شد. بدین منظور تعداد 120 نمونه خاک هوا خشک از الک 2 میلی‌متری عبور داده و منحنی‌های طیفی آن‌ها در دامنه‌های مرئی - مادون قرمز نزدیک (2500 - 350 نانومتر) با روش‌های استاندارد طیف‌سنجی در تاریک‌خانه اندازه‌گیری شد (ویسکارا راسل و همکاران، 2006). اندازه‌گیری‌های طیفی با بهره‌گیری از پیستولی مجهز به لنز 8 درجه که میدان دیدی به قطر 4/2 سانتی‌متر ایجاد می‌کند، انجام شد. منبع نور شامل یک لامپ هالوژن 150 وات با زاویه استقرار 45 درجه نسبت به محور قائم بود. زمان برداشت هر منحنی طیفی معادل 0/1 ثانیه بود. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری مقدار بازتابش و حذف آشفتگی‌های طیفی و واسنجی دستگاه، به ازای هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (White spectralon panel) که در وضعیتی مشابه با نمونه‌های خاک‌های اندازه‌گیری شده مستقر شده بود، انجام گردید. منحنی‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار RS3 موجود بر روی رایانه قابل حمل متصل به دستگاه ثبت شد. از هر نمونه خاک 5 اسکن برداشت شد. در مجموع 600 منحنی طیفی برای کل نمونه‌های خاک ثبت گردید. برای میانگین‌گیری از منحنی‌های طیفی هر نمونه خاک از نرم‌افزار ViewSpec. 6.0 استفاده شد.

داده‌های آزمایشگاهی و طیفی متغیرهای مورد مطالعه، به صورت تصادفی به دو گروه داده‌های واسنجی ($n=80$) و اعتبارسنجی ($n=40$) تقسیم شدند.

سپس با استفاده از روش رگرسیون چندگانه گام به گام رابطه‌ای ریاضی بین متغیرها به دست آمد. برای ارزیابی صحت نتایج حاصل، از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص انطباق (d) و درصد انحراف نسبی (RPD^5) استفاده شد. RMSE خطای مطلق برآوردها را اندازه‌گیری می‌کند، حال آن‌که ME مقدار کلی خطای نسبی و شدت بیش‌برآوردی یا کم برآوردی را نشان می‌دهد. شاخص d بیان‌کننده درجه‌ای از صحت بوده که در آن مقادیر تخمینی به دست آمده است. در مقایسه با R^2 که بیان‌گر همبستگی یا هم‌راستایی بین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای است، شاخص d بیان‌گر صحت برآوردها است و نشان می‌دهد که برآوردهای مدل تا چه اندازه عاری از خطا می‌باشد (ویلموت، 1981). شاخص RPD که اغلب در مطالعات طیف‌سنجی استفاده می‌شود، به سه دسته $1/4 <$ ، $1/4 - 2$ و $2 >$ که به ترتیب معرف تخمین ضعیف، قابل قبول و قوی می‌باشند، طبقه‌بندی شده است (ویسکارا راسل و همکاران، 2006؛ چنگ و لایرد، 2002). محاسبات در محیط نرم‌افزار SPSS 23 انجام شد. در زیر بیان ریاضی آماره‌های مذکور ارائه شده است:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (5)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}| + |y_i - \bar{y}|]^2} \quad (7)$$

که در آن‌ها، y_i و \hat{y}_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، \bar{y} و $\bar{\hat{y}}$ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای

متغیر نرمال استاندارد (SNV^1)، تصحیح پخشیده چندگانه (MSC^2)، مشتق اول همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی و مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی استفاده شد. براساس نتایج روش اعتبارسنجی متقابل با یک نمونه خارج شده³ و ارزیابی صحت نتایج حاصل، منحنی‌های حذف پیوستار و فیلتر Savitzky-Golay به صورت تابع چند جمله‌ای درجه اول، به عنوان مناسب‌ترین روش پیش‌پردازش داده‌های طیفی شناسایی شدند. شایان ذکر است که منحنی حذف پیوستار، منحنی است که براساس خطی محدب و فرضی که دو انتهای یک مشخصه جذب طیفی را به یکدیگر وصل می‌کند، کمی می‌شود. با بهره‌گیری از رابطه (1) می‌توان منحنی حذف پیوستار را محاسبه کرد (بابائیان و همکاران، 2015a,b)

$$R_{CR(\lambda i)} = \frac{R_{\lambda i}}{R_{CL(\lambda i)}} \quad (1)$$

که در آن، $R_{CR(\lambda i)}$ مقدار بازتاب در منحنی حذف پیوستار به ازای طول موج λi ، $R_{\lambda i}$ مقدار بازتاب طول موج متناظر در منحنی خام طیفی و $R_{CL(\lambda i)}$ مقدار بازتاب منحنی فرضی در طول موج‌های متناظر می‌باشد.

پس از محاسبه آماره‌های توصیفی، وضعیت نرمال بودن داده‌های خاکی به کمک آزمون کلموگروف-اسمیرنف در سطح معنی‌دار 5 درصد با بهره‌گیری از نرم‌افزار Minitab 16 ارزیابی شد. متغیرهای دارای توزیع غیرنرمال، با بهره‌گیری از تبدیل مناسب نرمال شدند. سپس، به منظور گزینش مناسب‌ترین متغیرهای برآورد کننده CEC، ضریب همبستگی پیرسون بین CEC و ویژگی‌های زودیافت خاک و مقادیر بازتاب طیفی به دست آمد. هم‌چنین، برای جلوگیری از هم‌راستایی خطی چندگانه بین متغیرهای مستقل، فاکتور عامل تورم واریانس⁴ (VIF) به وسیله نرم‌افزار SPSS 23 تعیین شد. در صورتی که شاخص VIF متغیری مستقل، بیشتر از مقدار بحرانی (5 تا 10) باشد، بدین معنی است که این متغیر با دیگر متغیرهای مستقل دارای همبستگی بوده و می‌تواند منجر به ایجاد هم‌راستایی خطی چندگانه شود. شایان ذکر است که در ایجاد روابط رگرسیونی چندگانه بایستی در استفاده از متغیرهای دارای هم‌راستایی چندگانه اجتناب کرد. به منظور ارزیابی صحت توابع پیشنهادی،

¹ Standard normal variate

² Multiplicative signal correction

³ Leave one out cross validation

⁴ Variance inflation factor

⁵ Relative percent deviation

و تخمینی، P تعداد ویژگی‌ها، N تعداد داده‌ها و SD نیز انحراف معیار داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک و ارزیابی همبستگی بین CEC با داده‌های زود یافت خاکی

در جدول (1)، توصیف آماری ویژگی‌های مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی که به ترتیب برای ایجاد و ارزیابی صحت توابع انتقالی استفاده شده‌اند، به تفکیک از هم ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول (1) مشاهده می‌شود مقدار رس و شن خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب در دامنه‌هایی از 16/05-57/36 و 4/26-61/57 درصد متغیر می‌باشد. نمونه خاک‌های مورد مطالعه هفت کلاس بافتی را شامل شده و از این نظر دارای تنوع مناسبی می‌باشند. رس و لوم رسی کلاس‌های بافتی غالب منطقه را تشکیل می‌دهند. با توجه به جدول (1)، میانگین جرم ویژه ظاهری، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل کل نمونه خاک‌ها به ترتیب معادل 1/60 گرم بر سانتی‌متر مکعب، 1/37 و 24/42 درصد می‌باشد. pH خاک‌های مورد مطالعه خنثی تا کمی قلیایی (7/1-7/92) بوده و مقدار شوری آن‌ها نیز اندک و در گستره 649/7 - 108/2 میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. همچنین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های مورد مطالعه در دامنه‌ی 7/84-25/99 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم به دست آمد. در مجموع توزیع و گستره ویژگی‌های مبنایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (1) نشان می‌دهد بین محدوده انتخابی داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی انطباقی مناسب وجود دارد. بنابراین، استفاده از سری داده‌های اعتبارسنجی برای ارزیابی صحت توابع ایجاد شده با سری داده‌های واسنجی، منجر به برون‌یابی¹ نخواهد گردید.

در جدول (2) ماتریس ضرایب همبستگی خطی بین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی و ویژگی‌های مبنایی خاک ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، CEC با متغیرهای رس ($r=0/50^{**}$)، شن ($r=-0/33^{**}$) و میانگین هندسی قطر ذرات ($r=-0/41^{**}$) در سطح یک درصد دارای همبستگی معنی‌داری می‌باشد. همبستگی مثبت و معنی‌دار CEC با رس به دلیل تأثیر این ذرات در ایجاد بارهای منفی و به تبع آن پدیده تبادل کاتیونی بوده که در پژوهش‌های قبل نیز به این موضوع اشاره شده است (بل و ون‌کولن، 1995؛ مانریکو و همکاران، 1991). بین CEC و مقدار شن

همبستگی منفی و معنی‌داری مشاهده گردید که می‌تواند به این دلیل باشد که ذرات شن دارای سطح ویژه‌ای ناچیز بوده و با زیاد شدن مقدار آن‌ها CEC خاک کاهش می‌یابد (امینی و همکاران، 2005). همبستگی بین CEC و میانگین هندسی قطر ذرات، منفی و معنی‌دار است؛ زیرا با افزایش میانگین هندسی قطر ذرات سطح ویژه ذرات و به تبع آن مقدار CEC خاک کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که CEC با کربنات کلسیم معادل ($r=-0/21^{**}$) در سطح 5 درصد نیز دارای همبستگی معنی‌داری بود. در بیشتر پژوهش‌های قبلی همچون هپر و همکاران (2006) و معلمی و دوات‌گر (1390) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین CEC و کربن آلی گزارش شده است؛ لیکن نتایج این پژوهش مغایر با یافته‌های این محققین می‌باشد. به نظر می‌رسد نبود همبستگی معنی‌دار CEC با کربن آلی در این پژوهش به دلیل کم بودن مقدار کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه باشد.

اشتقاق منحنی‌های حذف پیوستار طیفی و ارزیابی همبستگی بین CEC با داده‌های طیفی خاک

میانگین منحنی‌های خام و حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه در شکل (2) ارائه شده است. هرچند اختلافاتی در میزان شدت جذب و انعکاس طیفی خاک‌ها وجود دارد، لیکن رفتار کلی طیف‌ها در تمام خاک‌ها روند مشابهی دارد. منحنی‌های خام طیفی دارای یک برآمدگی در طول موج‌های 500 تا 600 نانومتر و سه مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های 1414، 1915 و 2212 نانومتر بودند. در منحنی‌های حذف پیوستار این مشخصه‌های طیفی به صورت واضح‌تری نشان داده شده است. یافته‌ها نشان داده‌اند که این مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک (1414 نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل شبکه کانی‌های رسی (1915) و پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آهن، آلومینیوم و منیزیم (2212 نانومتر) در شبکه کانی‌های رس می‌باشد (کلارک و همکاران، 1990). ویژگی‌های رایجی از خاک که بر مقدار بازتاب طیفی آن اثر می‌گذارد شامل رنگ خاک، مقدار رطوبت خاک، مقدار کربن آلی، توزیع اندازه ذرات و اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌باشد (استنبرگ و همکاران، 2010). به طور معمول، کربنات کلسیم باعث افزایش مقدار بازتاب خاک و کربن آلی و رطوبت خاک باعث کاهش مقدار آن می‌شود. بررسی‌ها نشان داده‌اند که مشخصه‌های جذبی مجاور طول موج 2341 نانومتر، می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های CO₃ موجود در کانی‌های کربناته باشد (گومز و همکاران، 2008).

¹ Extrapolation

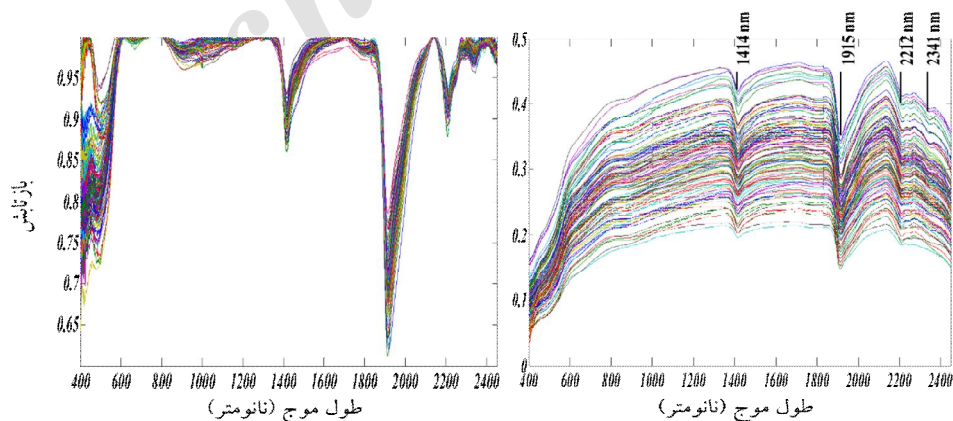
جدول 1- توصیف آماری ویژگی‌های خاک در دو سری داده‌ها واسنجی و اعتبارسنجی

رسنجی				واسنجی				ویژگی‌ها
انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	
10/05	55/48	16/05	37/64	8/11	57/36	17/22	37/52	رس (%)
5/24	43/89	22/15	35/55	7/321	54/79	22/04	37/67	سیلت (%)
12/99	61/57	8/03	27/07	10/02	52/08	4/26	24/38	شن (%)
0/025	0/125	0/006	0/029	0/023	0/088	0/005	0/023	میانگین هندسی قطر ذرات (mm)
2/89	20/55	8/63	14/15	3/1	20/77	6/89	13/82	انحراف معیار هندسی قطر ذرات
0/136	1/97	1/4	1/62	0/15	2/05	1/29	1/59	جرم ویژه ظاهری (g/cm ³)
0/51	3/02	0/55	1/4	0/48	2/34	0/25	1/34	کربن آلی (%)
4/14	25/35	8/29	15/58	4/60	25/99	7/84	15/45	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol _c /kg)
16/7	58/75	0/125	22/26	17/91	62/57	0/12	26/57	کربنات کلسیم معادل (%)
0/14	7/92	7/30	7/7	0/096	7/9	7/1	7/77	pH
103/86	645/2	108/2	229/84	79/39	649/7	114/3	232/85	EC (μS. cm ⁻¹)

جدول 2- ماتریس ضریب همبستگی بین ویژگی‌هایی مبنایی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

متغیر مورد بررسی	CaCO ₃	OC	EC	pH	Bd	σ _g	d _g	Sand	Silt	Clay
CEC	0/21*	0/03	-0/06	-0/01	0/01	-0/09	-0/41**	-0/33**	-0/10	0/50**

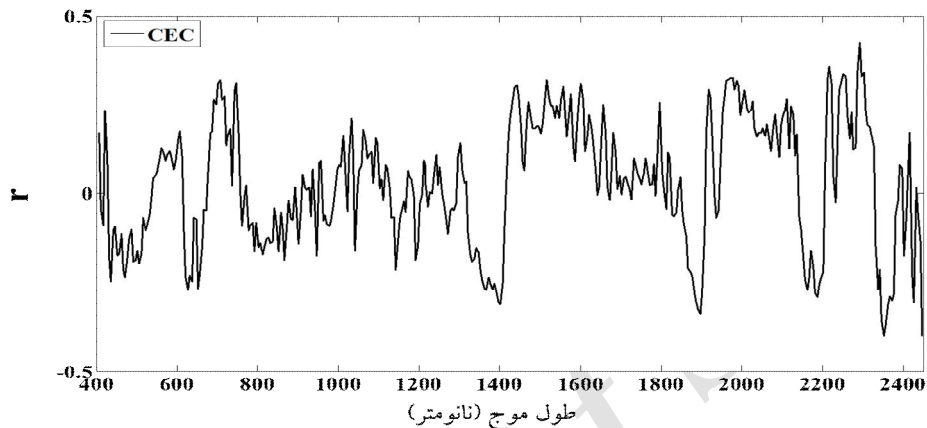
ns و * : به ترتیب بیان‌گر معنی‌داری در سطوح 5، 1 درصد و غیرمعنی‌دار بودن.



شکل 2- میانگین منحنی‌های خام و حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه (موقعیت مشخصه‌های جذبی در طول موج-های 1414، 1915، 2212 و 2341 نانومتر بروی شکل مشخص شده است).

معنی داری می‌باشد. بیشینه ضریب همبستگی برای CEC به ترتیب در طول موج‌های 2292، 2352 و 2447 معادل 0.43^{**} ، 0.40^{**} و 0.40^{**} به دست آمد. شایان ذکر است که وجود چنین همبستگی‌هایی بالایی بین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و مقادیر بازتاب طیفی توسط دیگر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (بیلگیلی و همکاران، 2010؛ ساویدز و همکاران، 2010).

در شکل (3) ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیر CEC با مقادیر بازتاب طیفی اشتقاق شده از منحنی-های حذف پیوستار، در گستره 400-2450 نانومتر ارائه شده است. نتایج حاصل از این شکل نشان می‌دهد بین CEC اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی در گستره مرئی - مادون قرمز نزدیک همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد. نتایج نشان داده‌اند که CEC خاک به‌ازای طول موج-های مختلف دارای همبستگی‌های مثبت و منفی



شکل 3- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین CEC خاک با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف

تخمین‌گر PTF حذف شدند. با توجه به نتایج، درصد رس مهمترین و کارآمدترین متغیر ورودی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌باشد. این در حالی است که در غالب پژوهش‌های قبلی، بیان شده که استفاده توأمان از متغیرهای رس و کربن آلی می‌تواند منجر به برآوردهایی صحیح‌تر از CEC خاک شود (مهاجر و همکاران، 1388؛ خداوردی‌لو و حسینی عربلو، 1393). مانریکو و همکاران (1991) تأثیر ماده آلی را در توابع ایجاد شده نسبت به رس حدود 20 برابر بیان کرده و علت آن را به بیشتر بودن اسید فولیک در ترکیبات آلی در مقایسه با اسید هومیک نسبت دادند. مغایر با این نتایج، بل و ون‌کولن (1995) تأثیر رس را بیشتر از ماده آلی به دست آورده و دلیل آن را سرعت تجزیه کم مواد آلی و کاهش اثر آن بر CEC بیان کردند. نتایج پژوهش حاضر نیز بیان‌گر عدم تأثیر کربن آلی بر CEC خاک بوده که می‌توان آن را به کم بودن ماده آلی در خاک‌های مورد مطالعه نسبت داد. بر اساس آماره ضریب تبیین، 27/0 درصد از تغییرات CEC در داده‌های واسنجی توسط رس توجیه می‌شود. افزون بر آماره R^2 ، دقت پیش‌بینی مدل توسط RPD، که نسبت انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده به ریشه حداقل میانگین مربعات خطای مدل می‌باشد، نیز مورد

از آنجا که برخی از ویژگی‌های زودیافت خاک (داده‌ها نشان داده نشده‌اند) و همچنین CEC اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف دارای همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌داری بودند؛ این امکان وجود دارد که بتوان از داده‌های بازتاب طیفی خاک و برخی ویژگی‌های زودیافت خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی را برآورد کرد. این بدین معنی است که می‌توان توابعی انتقالی (PTF)، توابعی انتقالی طیفی (SPT) و توابعی انتقالی مرکب (SPTF) را برای برآورد CEC خاک پیشنهاد کرد.

برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

اشتقاق تابع انتقالی خاک (PTF)

در جدول 3، تابع انتقالی که به‌منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اشتقاق یافته، ارائه شده است. ویژگی-هایی همچون فراوانی رس و شن، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک و کربنات کلسیم معادل که دارای همبستگی بالایی با متغیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بوده به‌عنوان متغیرهای زودیافت ورودی در PTF تخمین‌گر CEC خاک استفاده شدند. به‌منظور اجتناب از هم‌راستایی خطی چندگانه، متغیرهای مستقلی که دارای شاخص VIF بیشتر از 5 بوده از فهرست متغیرهای

پیشنهادی نیز معادل 3/69 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم به- دست آمد.

ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی آماره‌های RPD و R² مبین این واقعیت است که پیش‌بینی مدل پیشنهادی برای CEC خاک ضعیف می‌باشد. مقدار آماره RMSE برای مدل

جدول 3- مدل رگرسیونی تابع انتقالی پیشنهادی به‌منظور برآورد CEC خاک

تابع انتقالی خاک (PTF)	R ²	RPD	RMSE
CEC = 4.84 + 0.28 Clay	0/27	1/18	3/69

واحد RMSE همان واحد CEC یعنی cmol (+)/kg می‌باشد.

خاک با استفاده از داده‌های طیفی نشان دادند بین مقادیر اندازه‌گیری و برآوردی بیشتر ویژگی‌های مطالعه شده خاکی، تطابق بالایی وجود دارد؛ این محققین ضریب تبیین (R²) و ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) را برای داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب معادل 0/73 و 1/66 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم بدست آوردند. فیزیف و همکاران (2016) برخی از ویژگی‌های خاک‌های دشت مغان جمهوری آذربایجان را با بهره‌گیری از داده‌های طیفی برآورد کردند. این محققین ضریب تبیین (R²) و خطای تخمین (SE) را برای داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب معادل 0/62 و 0/54 محاسبه کردند. بیشتر بودن مقادیر R² و RPD و پایین بودن مقادیر RMSE تابع مذکور در مقایسه با تابع انتقالی پیشنهادی (نتایج جدول 3)، بیان‌گر نزدیک بودن داده‌های پیش‌بینی این مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده و صحت بالای آن در برآورد CEC خاک می‌باشد.

اشتقاق تابع انتقالی طیفی خاک (STF)

در جدول 4، تابع رگرسیونی خطی گام‌به‌گام اشتقاق یافته به‌منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از بازتاب طیفی در طول موج‌های مؤثر ارائه شده است. طول موج‌های مؤثر برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی در گستره مرئی شامل طول موج‌های 462، 432، 747 و 757 نانومتر و در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی به‌ترتیب شامل طول موج‌هایی در محدوده 1257 - 902 و 2442 - 2332 نانومتر می‌باشند. با توجه به نتایج، مقادیر آماره‌های R² و RMSE مدل پیشنهادی به ترتیب معادل 0/70 و 2/35 سانتی‌مول بار بر کیلوگرم است. آماره R² بیان‌گر این واقعیت است که تابع انتقالی طیفی پیشنهادی توانایی تبیین 70 درصد از تغییرات CEC را در منطقه مورد مطالعه دارا می‌باشد. با در نظر گرفتن این‌که مقدار آماره RPD نیز معادل 1/84 بوده، پیش‌بینی مدل پیشنهادی برای CEC قابل‌قبول می‌باشد. بیلگیلی و همکاران (2010) در پژوهشی با هدف تخمین ویژگی‌های

جدول 4 - تابع انتقالی طیفی به‌منظور برآورد CEC خاک

تابع انتقالی طیفی (STF)	R ²	RPD	RMSE
CEC = 22.97 + 4000 (-0.110R ₄₃₂ + 0.110R ₄₆₂ + 5.071R ₇₄₇ + 5.998R ₇₅₇ - 0.477R ₉₈₂ + 1.325R ₁₀₃₇ - 1.1416R ₁₁₁₂ + 1.719R ₁₂₅₇ - 0.5541R ₂₃₃₂ - 0.282R ₂₃₅₂ - 0.364R ₂₃₆₂ - 0.139R ₂₄₄₂)	0/70	1/84	2/35

R_w درصد بازتاب طیفی در طول موج w

رگرسیونی مربوط به SPTF برآورد کننده ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ارائه شده است. مقادیر R² و RMSE تخمین مقادیر CEC به ترتیب معادل 0/27 و 3/67 سانتی-مول بار بر کیلوگرم به‌دست آمد. افزون بر این آماره‌ها، صحت پیش‌بینی مدل نیز توسط آماره RPD مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج RPD، پیش‌بینی SPTF پیشنهادی برای CEC خاک ضعیف می‌باشد. در مقایسه با STF پیشنهادی (نتایج جدول 4)، تخمین غیرمستقیم CEC از طریق داده‌های طیفی (SPTF) باعث کاهش صحت تخمین CEC شده است.

اشتقاق تابع انتقالی مرکب خاک (SPTF)

از آنجا که هم ویژگی‌های زودیافت خاک و هم ظرفیت تبادل کاتیونی با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف دارای همبستگی بالا و معنی‌داری بودند؛ این احتمال وجود دارد که بتوان با پیش‌بینی ویژگی‌های مبنایی خاک از داده‌های طیفی، اقدام به برآورد CEC خاک با استفاده از این داده‌ها کرد. توابعی که در آن‌ها ویژگی-های زودیافت حاصل از داده‌های طیفی به‌عنوان ورودی توابع انتقالی مورد استفاده قرار می‌گیرند، توابع انتقالی طیفی مرکب (SPTF) نامیده می‌شوند. در جدول 5، رابطه

جدول 5- مدل رگرسیونی تابع انتقالی طیفی مرکب به منظور برآورد CEC خاک

تابع انتقالی طیفی مرکب (SPTF)	R ²	RPD	RMSE
Clay = 5.64 + 4000 (-3.555R ₆₇₂ + 4.571R ₇₃₂ - 4.862R ₁₂₆₇ - 3.039R ₁₄₆₂ - 1.367R ₁₈₁₂ + 1.839R ₁₉₆₇ - 0.326R ₂₃₃₂ - 0.463R ₂₃₆₂)	0/58	1/55	7/06
CEC = -0.19 + 0.41 Clay	0/27	1/18	3/67

R_w درصد بازتاب طیفی در طول موج w

صحت‌سنجی توابع انتقالی پیشنهادی

کمینه حالت کم‌برآوردی نیز برای STF معادل 0/35- به دست آمد. همچنین بیشینه مقدار RMSE برای تابع انتقالی مرکب خاک (معادل 4/06 سانتی مول بر کیلوگرم) و کمینه مقدار آن نیز برای تابع انتقالی طیفی خاک (معادل 2/57 سانتی مول بر کیلوگرم) محاسبه شد. این بدین معنی است که میزان خطای مطلق برآوردها برای SPTF بیشینه و برای STF کمینه می‌باشد.

در جدول 6، نتایج صحت‌سنجی توابع انتقالی پیشنهادی برآورد کننده CEC برای سری داده‌های آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس آماره ME، هر سه تابع پیشنهادی در پیش‌بینی CEC خاک دارای حالت کم‌برآوردی می‌باشند. با توجه به نتایج، بیشینه حالت کم‌برآوردی برای PTF معادل 2/76- و

جدول 6- صحت‌آزمایی تابع انتقالی طیفی (STF)، تابع انتقالی خاک (PTF) و تابع انتقالی مرکب (SPTF) به منظور برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از سری داده‌های آزمون (N=40)

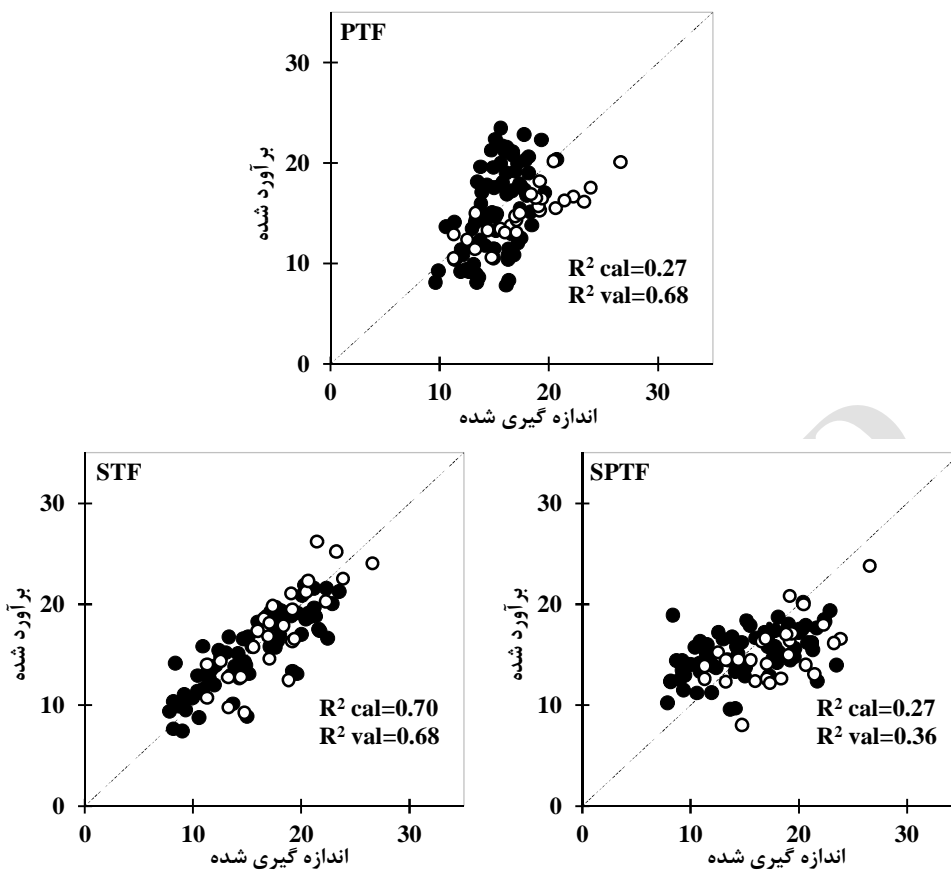
متغیر مورد بررسی	تابع پیشنهادی	ME	RMSE	d	R ²	RPD
CEC	STF	-0/35	2/57	0/90	0/68	1/50
	PTF	-2/76	3/55	0/74	0/68	1/09
	SPTF	-2/57	4/06	0/69	0/36	0/95

واحد RMSE و ME همان واحد CEC یعنی cmol (+)/kg می‌باشد.

برآورد شده و چگونگی توزیع آنها در اطراف خط 1:1 می‌تواند صحت این توابع پیشنهادی را بهتر نشان دهد. در شکل 4 نمودار پراکنش 1:1 مقادیر اندازه‌گیری شده CEC در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده آن در دو گروه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای توابع اشتقاقی STF، PTF و SPTF نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، STF، PTF و SPTF پیشنهادی با مقادیر R² آزمون برابر با 0/68، 0/68 و 0/36 به ترتیب توابعی از صحت خوب تا ضعیف را برای برآورد CEC خاک ارائه کرده‌اند. بالا بودن تراکم نقاط حول خط 1:1 در STF پیشنهادی در مقایسه با دو تابع انتقالی دیگر (شکل 4) تأییدی بر این موضوع است که STF پیشنهادی در مقایسه با PTF و SPTF از صحت بالاتری در برآورد CEC خاک برخوردار می‌باشد.

با توجه به آماره RPD، در بین سه تابع رگرسیونی پیشنهادی، بهترین تخمین برای ظرفیت تبادل کاتیونی خاک توسط STF (RPD=1/50) به دست آمد؛ این در حالی است که برای PTF و SPTF تخمین‌هایی کم‌صحت (RPD < 1/4)، به ترتیب معادل 1/09 و 0/95 محاسبه شد. مقدار متوسط شاخص d نیز برای هر سه تابع پیشنهادی STF، PTF و SPTF معادل 0/78 محاسبه شده است که بیان‌گر صحت قابل قبول این توابع در پیش‌بینی مقدار CEC می‌باشد. با توجه به این آماره بیشترین صحت برای STF (d=0/90) به دست آمد؛ حال آن‌که برای دو تابع پیشنهادی دیگر شامل PTF و SPTF صحتی کمتر به ترتیب برابر 0/74 و 0/69 محاسبه شد. صحت تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی توسط توابع انتقالی ممکن است حتی با وجود کوچک بودن مقادیر RMSE و بالا بودن مقادیر آماره‌های d و R² چندان قابل استنباط نباشد. بنابراین، نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر



شکل 4- نمودار صحت نتایج واسنجی (●) و اعتبارسنجی (○) مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده ظرفیت تبادل کاتیونی خاک توسط تابع انتقالی طیفی (STF)، تابع انتقالی مرکب (SPTF) و تابع انتقالی خاک (PTF)

نتیجه‌گیری کلی

خاک در گستره‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (350-2500 نانومتر)، می‌تواند به‌عنوان روشی سریع، با حداقل آماده‌سازی نمونه‌ها، غیرمخرب و غیرمستقیم برای برآورد CEC خاک مورد استفاده قرار گیرد. شایان ذکر است برآورد CEC خاک با استفاده از این توابع پیشنهادی نمی‌تواند به‌طور کامل جایگزین اندازه‌گیری‌های مستقیم آن شود. لذا استفاده از این توابع تنها در مواردی که نیاز به برآورد CEC خاک (نه تعیین میزان دقیق آن) وجود دارد، توصیه می‌گردد. بنابراین بهتر است این توابع انتقالی طیفی توسعه یافته، به دلیل دارا بودن ماهیت تجربی و تغییرپذیری مکانی و ویژگی‌های خاک (سبب بروز رفتار طیفی متفاوتی از خاک می‌شود)، برای سایر مناطق و خاک‌هایی متنوع‌تر نیز مورد ارزیابی قرار گیرند.

اندازه‌گیری مستقیم CEC خاک دشوار، زمان‌بر و پر-هزینه می‌باشد. نتایج بیان‌گر همبستگی مثبت و معنی‌داری CEC با برخی ویژگی‌های مبنایی خاک همچون مقدار رس و شن، میانگین هندسی قطر ذرات و کربنات کلسیم معادل بودند. همچنین با توجه به نتایج، همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌داری بین CEC با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف مشاهده گردید. لذا از این موضوع بهره گرفته و توابعی انتقالی (PTF)، انتقالی طیفی (SPT) و انتقالی مرکب (SPTF) برای برآورد CEC خاک پیشنهاد گردید. ارزیابی این توابع انتقالی ایجاد شده نشان-دهنده کارایی قابل‌قبول STF پیشنهادی در برآورد CEC خاک بود. این بدین معنی است که رفتارسنجی طیفی

فهرست منابع:

1. تقی‌زاده مهرجردی، ر. ا.، سرمدیان، ف.، ذوالفقاری، ع. ا.، جعفری، ا. 1394. پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های ایران با استفاده از روش‌های گوناگون. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، 1(38): 59-77.
2. خداوردی‌لو، ح.، حسینی عربلو، ن. آ. 1393. ایجاد، ارزیابی و مقایسه توابع انتقالی کلاسی و پیوسته برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در چند کلاس بافتی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، 18(67): 311-320.
3. معلمی، س.، دوات‌گر، ن. 1390. مقایسه توابع انتقالی رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌های گیلان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، 15(55): 169-181.
4. مهاجر، ر.، صالحی، و. ن.، بیگی هرچگانی، ح. 1388. 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)، 49: 83-97.
5. میرخانی، ر.، شعبانپور، م.، سعادت، س. 1384. محاسبه ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از بافت خاک و درصد ماده آلی در خاک‌های استان گلستان. مجله علوم آب و خاک، 19(2): 242-235.
6. هزارجریبی، ا.، نصرتی کاریزک، ف.، عبدالله‌نژاد، ک.، قربانی، خ. 1392. بررسی امکان پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از پارامترهای زودبافت. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، 27(4): 712-719.
7. 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. *Europ. J. Soil Sci.* 56: 551-559.
8. Babaeian, E., M. Homae, C. Montzka, H. Vereecken, and A. A. Norouzi. 2015a. Towards retrieving soil hydraulic properties by hyperspectral remote sensing. *Vadoze Zone J.* 14(3): doi:10.2136/vzj2014.07.0080.
9. Babaeian, E., M. Homae, H. Vereecken, C. Montzka, A. A. Norouzi, and M. T. van Genuchten, 2015b. A Comparative Study of Multiple Approaches for Predicting the Soil–Water Retention Curve: Hyperspectral Information vs. Basic Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79: 1043-1058.
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. Bilgili, A. V., H. M. Van Es, F. Akbas, A. Durak, and W. D. Hively. 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *J. Arid Environ.* 74(2): 229-238.
12. Chang, C.W. and D.A. Laird. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. *Soil Sci.* 167(2): 110-116.
13. Clark, R.N., T.V.V. King, M. Klejwa, G.A. Swayze, and N. Vergo. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, 1990, 95.B8: 12653-12680.
14. Feyziyev, F., M. Babayev, S. Priori, and L. Giovanni. (2016). Using Visible-near infrared spectroscopy to predict soil properties of Mugan plain, Azerbaijan. *J. Soil Sci.* 6: 52-58
15. Gomez, C., P. Lagacherie, and G. Coulouma. 2008. Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2): 141-148.
16. Hepper, E. N., D. E. Buschiazzo, G.G. and A. Hevia. Urioste, and L. Anton. 2006. Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma*, 135: 216-223.

17. Islam, K., B. Singh, and A. B. McBratney. 2003. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. *Soil Res.* 41(6): 1101-1114.
18. Janik, L.J., S.T. Forrester, and A. Rawson. 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometr Intell Lab Sys.* 97(2): 179-188.
19. Keller A., B. Von Steiger, S.T. Van der Zee, and R. Schuline. 2001. A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. *J. of Environ Qual.* 30:1976-1989.
20. Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (No. Ed. 2). American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1358.
21. Krogh, L., H. Breuning-Madsen, and M. H. Greve. 2000. Cation exchange capacity pedotransfer function for Danish 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. Manrique, L.A., C.A. Jones, and P. T. Dyke. 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55(3): 787-794.
23. McBratney A.B., B. Minasny, S. R. Cattle, and R. W. Vervoort. 2002. From pedotransfer function to soil inference systems. *Geoderma*, 93:225-253.
24. Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1159.
25. Savvides, A., R. Corstanje, S. J. Baxter, B. J. Rawlins, and R.M. Lark. 2010. The relationship between diffuse spectral reflectance of the soil and its cation exchange capacity is scale-dependent. *Geoderma*, 154(3): 353-358.
26. 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.* 69:856-86.
27. Shepherd, K.D., and M. G. Walsh. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(3): 988-998.
28. Shirazi, M.A., and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.
29. Stenberg, B., R. A. V. Rossel, A. M. Mouazen, and J. Wetterlind, 2010. Chapter five-visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Adv. Agron.* 107: 163-215.
30. Vereecken, H., M. Weynants, M. Javaux, Y. Pachepsky, M. G. Schaap, and M. Th. van Genuchten. 2010. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone J.* 9(4): 795-820.
31. Viscarra Rossel, R., R. McGlynn, A. McBratney. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137(1): 70-82.
32. Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geogr.* 2: 184–194.

Deriving and Assessing Spectrotransfer Function and Pedotransfer Function in Predicting Soil Cation Exchange Capacity

S. A. Karimi, M. Davari¹ and E. Babaeian

Former MSc. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran; E-mail: salahkaarimi@yahoo.com

Assistant Professor., Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran; E-mail: m.davari@uok.ac.ir

PhD., Soil, Water and Environmental Science Department, University of Arizona, USA;
E-mail: ebabaeian@email.arizona.edu

Received: December, 2016 and Accepted: October, 2017

Abstract

Cation exchange capacity (CEC) is an important soil physicochemical property that has great effect on fertility and soil quality management. Measurement of CEC is difficult, time-consuming and expensive. The objective of this study was to assess whether inclusion of soil spectral data as a unique set of the predictors and alternative to soil basic properties would improve CEC predictions. Consequently, a total of 120 soil samples were collected from surface soil layer. The CEC and easily-determined soil properties were measured by standard laboratory methods. The spectral reflectance of soils over 350 to 2500 nm range were also determined using a handheld spectroradiometer apparatus. Different pre-processing techniques were evaluated after recording the spectra. Stepwise multiple linear regression (SMLR) was used to estimate some soil properties and CEC. Three scenarios including spectrotransfer functions (STF), pedotransfer functions (PTF) and spectropedotransfer functions (SPTF) were investigated. Results showed that STF had higher accuracy (RPD=1.50; RMSE=2.57 cmolc/kg) than the others in predicting soil CEC. PTF (RPD=1.09; RMSE=3.55 cmolc/kg) and SPTF (RPD=0.95; RMSR=4.06 cmolc/kg) provided poor predictions accuracy. These results suggest the efficacy of the spectral data, which can be used as an indirect, simple, and fast method to predict soil cation exchange capacity.

Keywords: Soil spectral reflectance; Stepwise multiple linear regression; Continuum removed spectrum; Easily-determined soil properties

¹ Corresponding author: Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.