

برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از طیف‌سنجی بازتابی

فاطمه موسوی^۱، احسان عبدی^{۲*}، عباس قلندرزاده^۳، حسینعلی بهرامی^۴، باریس مجنونیان^۵ و سهام میرزایی^۶

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ۲- دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۵- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ۶- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۲

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۰۷

چکیده

در این پژوهش قابلیت بازتاب طیفی خاک به منظور برآورد مقدار CEC خاک بررسی شد. به همین منظور تعداد ۴۵ نمونه خاک از بخش نم‌خانه جنگل خیرود جمع‌آوری و بازتاب طیفی آن‌ها در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری و ارتباط آن با مقادیر CEC اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (Partial Least Squares Regression: PLSR)، دو گروه از شاخص‌های باریک‌باند خاک (DI, RI) نیز برای برآورد CEC در دو حالت طیف بازتابندگی و مشتق آن استفاده شدند و سپس مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد که به‌طور کلی شاخص‌های باریک‌باند ارتباط قوی‌تری با CEC نسبت به روش PLSR دارند و در حالت مشتق اول شاخص DI بیشترین همبستگی ($R^2 = 0/82$, $RMSE = 0/01$) نسبت به دیگر حالت‌های شاخص‌ها مشاهده شد. در روش PLSR طیف خام با CEC ارتباط قوی‌تری نسبت به مشتق اول نشان داد، درحالی‌که در استفاده از روش شاخص‌های باریک‌باند، مشتق اول و CEC ارتباط قوی‌تری نسبت به طیف خام نشان دادند؛ بنابراین با توجه به اینکه بین CEC و بازتاب طیفی خاک ارتباط بسیار قوی وجود دارد، می‌توان از طیف‌سنجی بازتابی به‌عنوان روشی غیرمخرب، سریع، آسان و کم‌هزینه برای برآورد CEC استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بازتاب، شاخص‌های باریک‌باند خاک، طیف‌سنجی، PLSR، CEC.

مقدمه

پژوهش‌هایی که تاکنون صورت گرفته می‌توان به استفاده از مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی CEC (Amini et al., 2005; Bayat et al., 2014; Ghorbani et al., 2015) و رگرسیون چندگانه و مدل‌های استنتاج فازی تطبیقی (ANFIS) (Ghorbani et al., 2015) اشاره کرد. همچنین Hosseini Arablu et al., 2015) و همکاران (2015) تأثیر گروه‌بندی خاک‌ها بر اساس مقدار کربن آلی و رس آن‌ها بر کارایی توابع انتقالی سلسله مراتبی گنجایش CEC را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که رس تأثیرگذارترین عامل در برآورد CEC خاک‌های مورد بررسی بود.

در دهه‌های اخیر روش طیف‌سنجی بازتابی به‌عنوان روشی کارآمد برای استخراج اطلاعات مهم درباره ویژگی‌های خاک عمل کرده است و با پیشرفت فناوری و ساخت سنجنده‌های ابرطیفی و طیف‌سنج‌ها تحول بزرگی در بررسی خاک صورت گرفته است. داده‌های طیف‌سنجی به‌دلیل پیوستگی و پهنای کم باندهای طیفی، قابلیت بالایی در بررسی، پایش و کمی‌سازی ویژگی‌های خاک دارا هستند. طی دو دهه اخیر، پژوهش‌هایی در مورد طیف‌سنجی بازتاب امواج مرئی و فروسرخ در علوم خاک به‌سرعت افزایش یافته است (Stenberg et al., 2010; Stenberg and Rossel, 2010) اما تمرکز بیشتر پژوهش‌ها، روی اجزای اصلی خاک مانند مواد آلی خاک، بافت خاک، شناخت کانی‌های خاک و همچنین، دسترسی عناصر غذایی خاک، حاصلخیزی خاک، ساختمان خاک و فعالیت‌های میکروبی آن است و در زمینه ویژگی‌هایی مانند CEC پژوهش‌های کمتری انجام شده است.

از مهم‌ترین مزایای روش طیف‌سنجی می‌توان به مخرب نبودن آن و زمان کم برای آماده‌سازی نمونه اشاره کرد. همچنین آماده‌سازی نمونه در این روش

خاک‌های متورم‌شونده به‌دلیل مشکلات ناشی از تورم به‌دلیل جذب آب، برای سازه‌های مهندسی که روی خاک بنا می‌شوند مشکلاتی را ایجاد می‌کنند. برای مثال تورم خاک می‌تواند موجب وارد آمدن خسارت به رویه جاده‌های جنگلی شود و یکپارچگی آن را از بین برده و نسبت به آب نفوذپذیر کند. این پدیده در مناطقی که در طول سال دارای یخبندان هستند نیز می‌تواند سبب تخریب سریع جاده‌ها شود؛ بنابراین تا حد ممکن با شناخت این نوع خاک‌ها باید از ساخت جاده بر روی این نوع خاک‌ها جلوگیری به‌عمل آورد (Mousavi and Abdi, 2015) یا اینکه ابتدا خاک را با روش‌های مناسب تثبیت کرد. بیشتر روش‌های برآورد پتانسیل تورمی خاک بر اساس تشخیص رس-های معدنی و خصوصیات دیگر خاک مانند ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation Exchange Capacity) استوار هستند (Chen, 1988, Nelson and Miller, 1992)؛ بنابراین اندازه‌گیری این ویژگی در مسائل مرتبط با مهندسی حائز اهمیت بسیار بالایی است.

ظرفیت تبادل کاتیونی برابر یون‌های قابل تبادل تعریف می‌شود و برحسب سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم بیان می‌شود. در واقع تعداد نسبی کاتیون‌ها و مولکول‌های آبی که موردنیاز است برای این‌که کانی‌های رسی را به حالت تعادل برگردانند، به‌وسیله روش ظرفیت تبادل کاتیونی تعیین می‌شود. به‌طورکلی روش‌های آزمایشگاهی که در اندازه‌گیری این ویژگی‌ها استفاده می‌شود بسیار وقت‌گیر و مشکل هستند و به‌دلیل استفاده از مواد شیمیایی فراوان علاوه بر خطرناک بودن این مواد، هزینه انجام این آزمایش نیز زیاد است. همچنین مواردی مانند جاده‌سازی نیاز به نمونه‌برداری زیاد خاک دارد. از این‌رو داشتن مدلی که بتواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را برآورد کند، ضروری است. از

روش، شاخص‌های باریک‌باند جدید خاک با ترکیب تصادفی دو یا چند باند از بین همه باندهای موجود، شناسایی می‌شود و مقدار همبستگی آن‌ها با مقدار متغیر موردنظر ارزیابی می‌شود (Bahrami et al., 2016).

داده‌های طیف‌سنجی علاوه بر حجم بالای داده (تعداد بالای باند)، دارای اثر هم‌پوشانی عوامل مختلف در هر طول‌موج و اطلاعات تکراری در طول‌موج‌های مجاور (دارای همبستگی بالایی) هستند و بنابراین همه داده‌ها حاوی اطلاعات جدید از متغیرهای موردنظر نیستند (Yao et al., 2015)؛ بنابراین استفاده از روش‌های فشرده‌سازی اطلاعات برای استخراج اطلاعات از این داده‌ها رایج است. PLSR یکی از معمول‌ترین روش‌های آماری چندمتغیره موجود در این زمینه است که از داده‌های طیفی در تمامی طول‌موج‌ها استفاده کرده و با فشرده‌سازی آن‌ها در تعداد کم‌تری عامل و ایجاد یک مدل رگرسیون خطی، ویژگی‌های موردنظر خاک مانند کلسیم و منیزیم (Rossel and McBratney, 2008, Bilgili et al., 2010)، نیتروژن (Xie et al., 2011)، کلسیم کربنات (Gomez et al., 2008)، درصد رس (Rossel; Gomez et al., 2008) and McBratney, 2008 (Kandel et al., 2013)، مواد آلی (Rossel and McBratney, 2008) Xie et al., 2011، 2013 (Kandel et al., 2013) و CEC (Kariuki et al., 2003) Rossel and McBratney, 2008. al., 2003 (et al., 2014) را برآورد می‌کند.

با توجه به موارد ذکر شده این پژوهش با هدف بررسی توانایی استفاده از طیف‌سنج بازتابی به‌عنوان روشی سریع و ارزان در برآورد CEC خاک مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین در این پژوهش قابلیت روش‌های PLSR و شاخص‌های باریک‌باند خاک در حالت طیف بازتابندگی و مشتق اول طیفی به‌منظور

فقط شامل هوا خشک‌کردن و نرم کردن نمونه خاک است. از دیگر مزایای این روش این است که نمونه خاک دچار تغییر و تحول نمی‌شود، مواد شیمیایی مصرف نمی‌شوند، اندازه‌گیری در چند ثانیه انجام می‌شود، تعداد زیادی از ویژگی‌های خاک فقط با یک‌بار اسکن کردن قابل تشخیص هستند و به عبارتی قابلیت استفاده به‌منظور برآورد ویژگی‌های زیادی از خاک را دارد و این روش قابلیت اجرا هم در آزمایشگاه و هم در عرصه را دارا است. نوع پیش‌پردازش داده‌های طیفی (Waiser et al., 2007) و همچنین دامنه طیفی از آن منظور که دستگاه بتواند داده‌هایی ثبت کند که محدوده‌های جذب طیفی کافی برای بررسی ویژگی موردنظر در آن محدوده را داشته باشد، اثر قابل‌توجهی بر نتایج حاصل از استفاده داده‌های طیفی برای تحقیقات خاک خواهد داشت (Tian et al., 2013).

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های استخراج اطلاعات خاک از تصاویر ماهواره‌ای، روش شاخص‌های پهن باند خاک است (Waiser et al., Tucker, 1979). در داده‌های پهن باند میانگین‌گیری از اطلاعات طیفی در دامنه وسیع طیف الکترومغناطیس، سبب از بین رفتن اطلاعات می‌شود و در زمینه کمی‌سازی مقدار این شاخص‌ها دچار محدودیت می‌شود (Hansena and Schjoerrin, 2003). در سال‌های اخیر پژوهش‌های اندکی از روش ماتریس همبستگی برای انتخاب بهترین عملکرد شاخص‌ها (انتخاب باندهای بهینه) در برآورد ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی (Bartholomeus et al., 2008, 2009, Zhang et al., 2013, Tian et al.)، عناصر خاک شامل سدیم و کلسیم (Yu et al., 2016) و شوری (Nawer et al., 2015) استفاده کرده‌اند اما تا به حال پژوهشی با استفاده از روش شاخص‌های باریک‌باند در زمینه CEC انجام نشده است. در این

جاننشینی کاتیون‌های تبادل‌پذیر با استفاده از سدیم استات، تعیین شد (Bower et al., 1952).

به‌همین منظور مقدار پنج گرم خاک ردا شده از الک دو میلی‌متری را در لوله سانتیفریژ ریخته و سپس ۳۳ میلی‌لیتر استات سدیم اضافه کرده و به مدت پنج دقیقه در سانتیفریژ قرار داده شد. بعد محلول رویی را خالی کرده و این کار را سه مرتبه تکرار کرده و به این ترتیب جایگزینی یون‌های سدیم به جای کاتیون‌های موجود در کلئوئید خاک تکمیل می‌شود. در مرحله بعد ۳۳ میلی‌لیتر از محلول الکلی را به خاک اضافه کرده و سپس پنج دقیقه در سانتیفریژ قرار داده شد و دوباره محلول را بیرون ریخته و این عمل نیز سه بار تکرار شد، که این کار سبب می‌شود اضافه استات سدیم از محیط خارج شود. سپس خاک را سه مرتبه و هر مرتبه با ۳۳ میلی‌لیتر استات آمونیوم شستشو داده و محلول رویی در پایان کار جمع‌آوری شد و داخل یک لوله سانتیفریژ ریخته و حجم آن را به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و سپس محلول به دست آمده را با استفاده از دستگاه فیلتر قرائت کرده و با توجه به منحنی استاندارد غلظت نمونه محلول به دست می‌آید (Bower et al., 1952).

اندازه‌گیری بازتاب طیفی

در ابتدا خاک ردا شده از الک در پتری‌دیش مشکی ریخته و سطح آن‌ها به وسیله کاردک صاف شدند. اندازه‌گیری طیفی نمونه‌های در آزمایشگاه طیف‌سنجی با استفاده از دستگاه طیف‌سنج 3 Fieldspec با دامنه طیفی کامل (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) با روش پروب تماسی (Contact probe) انجام شد. تعداد تکرار برای ثبت هر طیف ۷۲ تنظیم و به منظور کم کردن احتمال ناهمگنی موجود در نمونه، اندازه‌گیری طیفی برای هر نمونه ۱۰ بار با تغییر مکان پروب تکرار شد.

برآورد مقدار CEC خاک بررسی و در نهایت باندهای بهینه و محدوده‌های طیفی مطلوب برای بررسی CEC خاک معرفی شد.

مواد و روش

منطقه مورد بررسی و نمونه‌برداری خاک

این بررسی در بخش نم‌خانه جنگل آموزشی-پژوهشی دانشکده منابع طبیعی (جنگل خیرود) انجام شده است. در تهیه طرح نمونه‌برداری، از نقشه شیب، جهت، ارتفاع به عنوان مبنای انجام پژوهش استفاده شد. علاوه بر این، نقشه مقدار درصد رس منطقه (Salehi et al., 2005) نیز مورد استفاده قرار گرفت. با روی هم‌گذاری نقشه شکل زمین و مقدار درصد رس خاک، محدوده‌های همگن تعیین شد. در روی نقشه حاصله با شناسایی واحدهای همسان نسبت به تعیین محل نمونه‌برداری اقدام و از گزینش واحدهای تکراری پرهیز شد. سپس تعداد نمونه‌ها با توجه به وضعیت محدوده‌های همگن تعیین شد. محل نمونه‌برداری به صورت تصادفی در درون پلی‌گون‌های همگن مشخص شد. با مشخص شدن محل پروفیل در عرصه با استفاده از GPS، اقدام به کنار زدن مواد آلی و لاشبرگ و خاک سطحی از سطح زمین شد. در هر نقطه انتخابی، یک نمونه خاک دست‌خورده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشته و در کیسه‌های پلاستیکی دوجداره همراه با شماره پروفیل قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شد. در کل ۴۵ نمونه خاک از منطقه مورد بررسی جمع‌آوری شد.

اندازه‌گیری CEC خاک

بعد از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، نمونه‌های دست‌خورده پس از خشک شدن و کوبیده شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و سپس CEC، به روش

پیش پردازش داده‌های طیفی

مختلف موجود در خاک است و موجب کم شدن تغییرات بین نمونه‌ها می‌شود (Martens and Naes, 1989). برای بیان مقدار قوت نتایج مدل از آماره‌های ضریب تبیین (R^2) (رابطه ۱)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۲) استفاده شد (Rossel and McBratney, 2008):

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

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

در این روابط \hat{y}_i مقادیر برآوردی، y_i مقادیر مشاهداتی، \bar{y} میانگین مشاهدات و N تعداد داده‌ها است.

در انتخاب تعداد بهینه مؤلفه‌های مورد استفاده در مدل رگرسیون نیز از روش اعتبارسنجی متقاطع، استفاده شده است. در این روش عامل‌هایی انتخاب می‌شوند که مقدار RMSE را به حداقل ممکن می‌رساند (Blanco et al., 1996). در این روش برای حفظ بهینه بودن مدل شرط لازم برای افزایش مقدار مؤلفه‌ها کاهش مقدار RMSE برای روش اعتبارسنجی متقاطع است (Cho et al., 2007).

شاخص‌های باریک باند و ارتباط آن‌ها با CEC

شاخص‌های نسبت طیفی (Ratio index) و تفاضل طیفی (Difference index) برای همه ترکیبات طول‌موجی دو بانده ممکن بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر محاسبه شد. فرمول‌های استفاده‌شده برای محاسبه این شاخص‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای هر یک از این شاخص‌ها جفت طول‌موجی که با قرار دادن آن در شاخص بیشترین مقدار همبستگی با مقدار CEC را نشان می‌دهد، تعیین می‌شود.

داده‌های بازتاب طیفی با استفاده از نرم‌افزار ViewSpec به داده‌های متنی با فرمت ASCII تبدیل و وارد نرم‌افزار MATLAB شد. طیف‌های خام هر نمونه را با هم مقایسه و طیف‌هایی که بیشتر از ± 2 برابر انحراف معیار از میانگین فاصله داشتند حذف شدند (Yitagesu et al., 2009). به دلیل مقدار بالای نویز، محدوده ۴۰۰-۳۵۰ نانومتر از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت. در این پژوهش از فیلتر ساویتزکی-گولای (Savitzky and Golay, 1964) با درجه ۲ اندازه پنجره ۱۵ استفاده شد. سپس از ۱۰ تکرار موجود برای هر نمونه میانگین‌گیری شد و مشتق اول طیف بازتابندگی نیز محاسبه شد و از آن‌ها برای پردازش مورد استفاده قرار گرفت.

مدل‌سازی با استفاده از PLSR

از مدل PLSR برای پیش‌بینی CEC استفاده شد. در این روش از طریق یک رابطه خطی چندمتغیره، ارتباطی بین دو ماتریس x و y ایجاد می‌شود که اولین بار توسط Wold و همکاران (2001) معرفی شد و به‌طور گسترده‌ای در آنالیزهای طیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل PLSR هر دو متغیر x و y را تجزیه کرده و اجزای جدیدی ایجاد می‌کند که به آن‌ها متغیرهای پنهانی گفته می‌شود که هر دوی آن‌ها ترکیبات متعامد (orthogonal) و وزن‌دار (weighted) از متغیرهای x هستند. این متغیرهای جدید برای برآورد متغیرهای y به‌کار می‌روند که در اینجا x بیانگر بازتاب خاک و y نیز CEC است. از داده‌های بازتابندگی و مشتق اول آن برای این پردازش‌ها استفاده شد. طیف مشتق اول به‌طور کلی عوارض جذبی را بزرگ‌نمایی می‌کند که نشان‌دهنده مقدار مواد

جدول ۱- شاخص‌های باریک باند خاک مورد استفاده در این تحقیق

Table1. Narrow band soil indices formulas used in this study

مرجع Reference	معادله شاخص Equation of index	شاخص‌های خاک Indices of soil	نام شاخص Index
(Tian <i>et al</i> , 2013)	$RI(R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}) = R_{\lambda_1} / R_{\lambda_2}$	شاخص نسبتی	RI
(Tian <i>et al</i> , 2013)	$DI(R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}) = R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$	شاخص تفاضلی	DI

R Indicates the amount of reflection, λ_1 and λ_2 are wavelength.R نشان‌دهنده مقدار بازتاب، λ_1 و λ_2 طول موج هستند.

ارزیابی صحت

آزمون توزیع نرمال بودن خطاها بررسی و نتایج نشان داد توزیع داده‌ها نرمال است. همبستگی تک‌باندی بین ارزش بازتابندگی هر طول موج و CEC نیز محاسبه و نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق این شکل بیشترین مقادیر همبستگی در باندهایی با مراکز تقریباً ۱۴۲۰، ۱۹۲۰، ۲۲۰۰ نانومتر و بیشترین مقدار همبستگی در ۲۲۰۰ نانومتر برابر ۰/۴۸ مشاهده می‌شود.

نتایج پردازش طیف‌ها و داده‌های آزمایشگاهی با استفاده

از مدل PLSR

شکل ۳ نتیجه اعمال روش PLSR در حالت طیف بازتابندگی (الف) و مشتق اول طیفی (ب) با CEC را در حالت کالیبراسیون نشان می‌دهند. شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای ریشه مربعات (RMSE) مربوط به این روش در جدول ۳ نشان داده شد که مطابق نتایج به دست آمده، کالیبراسیون مدل PLSR ساخته شده با طیف بازتابندگی و مشتق اول به ترتیب دارای همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۷۴ و RMSE، ۵/۲۱ و ۵/۷۳ است که این مقادیر برای گروه اعتبارسنجی نیز تقریباً مشابه است. در جدول ۴ رابطه رگرسیونی بین CEC و مؤلفه‌های حاصل از طیف بازتابندگی و مشتق اول طیفی آورده شده است.

از آنجاکه مدل‌های استفاده شده زیرمجموعه مدل‌های تجربی محسوب می‌شوند، لازم است دقت و صحت آن‌ها در مقابل دیگر ورودی‌ها که قبلاً در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، مورد آزمون قرار گیرد. مقدار صحت برآورد CEC خاک با روش‌های شاخص‌های باریک‌باند و PLSR به وسیله روش اعتبارسنجی متقاطع انجام شد. دلیل استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع کم بودن تعداد نمونه‌ها است (Yitagesu *et al.*, 2009). در این روش ابتدا کل نمونه‌ها به قسمت‌های مشخصی تفکیک شده که در این تحقیق تعداد قسمت‌ها، برابر با تعداد نمونه‌ها (۴۵) قرار داده شد. برای ارزیابی صحت یکی از نمونه‌ها کنار گذاشته شد و با ۴۴ نمونه باقی‌مانده، مدل‌سازی و مقدار نمونه کنار گذاشته شده برآورد شده است. این فرآیند به تعداد نمونه‌ها تکرار شده و در نهایت مقادیر برآورد شده در نبود نمونه با مقدار واقعی نمونه مقایسه شد.

نتایج

نتایج آنالیز آماری ویژگی CEC خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. نرمال بودن داده‌های CEC خاک با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح پنج درصد و

جدول ۲- نتایج آنالیز آماری (CEC cmolc/kg) برای ۴۵ نمونه خاک

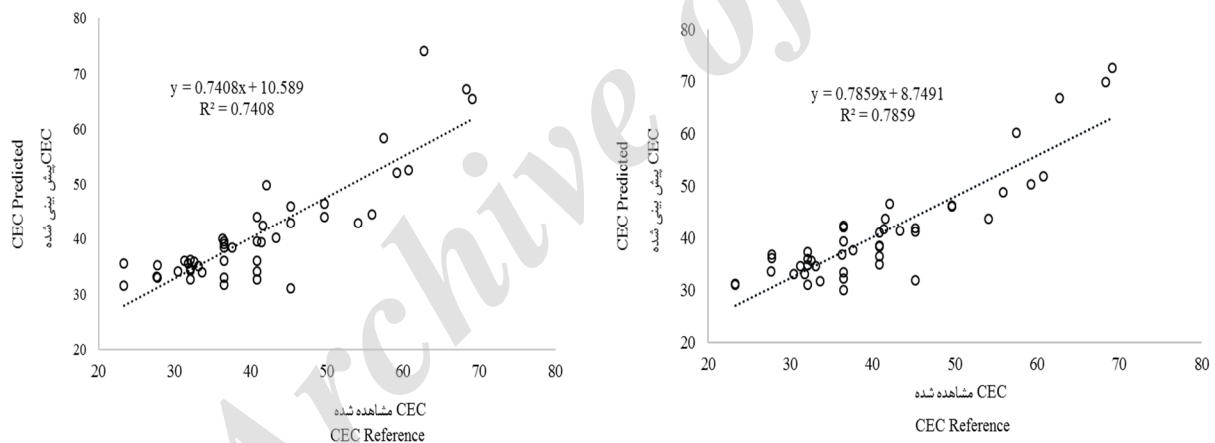
Table 1. Results of descriptive statistics for CEC (cmolc/kg) of 45 soil samples

تعداد نمونه	انحراف معیار	میانه	میانگین	حداکثر	حداقل
N	StDev	Median	Mean	Max	Min
45	11.26	39.21	40.85	69.1	23.33



شکل ۲- همبستگی تک‌باندی (R^2) بین ارزش بازتابندگی هر طول‌موج و CEC

Figure 2. Correlation coefficient (R^2) between wavelength and CEC



شکل ۳- رابطه بین طیف خام (الف) و مشتق اول (ب) با CEC

Figure 3. The observed vs. predicted plot between Reflectance spectra (A) and Derivative of reflectance spectra (B) with CEC

جدول ۳- نتایج پردازش طیف‌ها و داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل PLSR

Table 3. The results of PLSR analysis

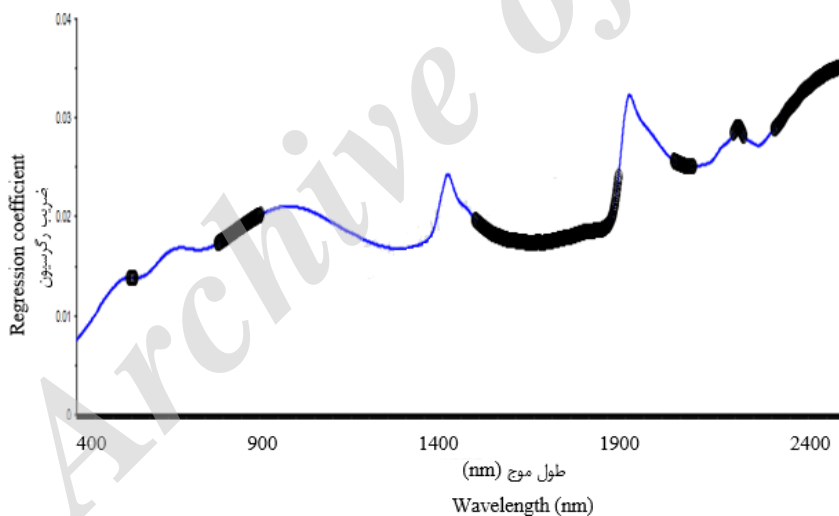
اعتبارسنجی			کالیبراسیون			تعداد عامل‌های بهینه	پیش پردازش
Validation			Calibration				
RPD	RMSE	R^2	RPD	RMSE	R^2	Number of factors	Preprocessing
1.84	6.1	0.71	2.16	5.21	0.78	4	طیف خام Reflectance spectra
1.83	6.15	0.73	1.96	5.73	0.74	1	مشتق اول First derivative

جدول ۴- رابطه رگرسیونی بین CEC با طیف بازتابندگی و مشتق اول طیف

رابطه رگرسیونی	ویژگی	پردازش
Regression equation	Property	Processing
$y = 40.85 - 2.86X_1 + 12.68 X_2 + 19.44X_3 + 26.22X_4 + 30.57$		طیف خام Reflectance spectra
$y=40.85-2381.03X_1+34.42$	CEC	مشتق اول First derivative

Test) در نرم افزار Unscrambler استفاده شد. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، مهم ترین باندها برای پیش بینی CEC شامل محدوده های ۹۱۰-۷۸۸، ۹۳۸-۹۵۰، ۱۰۸۰-۱۱۱۳، ۱۴۸۸-۱۸۸۵، ۱۹۰۷-۱۹۲۰، ۲۰۸۵-۲۰۰۸، ۲۱۹۶-۲۲۲۵، ۲۳۰۶-۲۵۰۰ نانومتر است.

در شکل ۴ بردار رگرسیون PLS در مدل نهایی ساخته شده برای CEC نشان داده شده است که در این شکل مناطق نشان داده شده با خطوط پهن مشکی نشان دهنده طول موج های مهم برای برآورد CEC خاک هستند. برای این منظور ابتدا داده های ورودی طیف نرمال شده و برای تعیین طول موج های مهم از روش آزمون عدم قطعیت مارتین (Martens' Uncertainty



شکل ۴- بردار رگرسیون برای برآورد CEC خاک

Fig4- Regression vector for estimate CEC

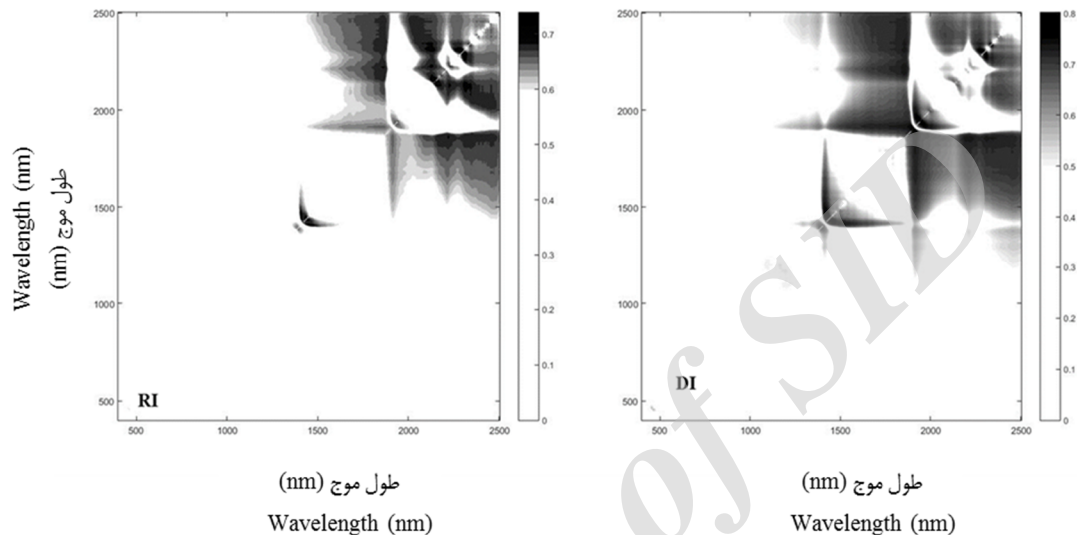
از شاخص ها که بیشترین مقدار همبستگی را با CEC دارند می توان شناسایی کرد. در این شکل نواحی طیفی که دارای همبستگی بالا با CEC هستند، با رنگ تیره تر کاملاً مشخص است. برای واضح تر شدن همبستگی های بالا بین بازتاب های طیفی با CEC

نتایج شاخص های طیفی برای CEC خاک

در شکل ۵ مقدار همبستگی بین شاخص های محاسبه شده در حالت های ممکن و CEC خاک به صورت پلات دوبعدی نشان داده شده است. بر اساس مقادیر R^2 ، ترکیبات باندی بهینه را برای هر یک

موجود یا برای طراحی باند مناسب برای بررسی CEC خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای کمک کند. در جدول ۵ ترکیب باندی بهینه برای دو شاخص استفاده- شده و مقادیر R^2 و RMSE برای این شاخص‌ها نشان داده شده است.

خاک، بخش‌هایی از پلات که رابطه ضعیف‌تری نشان دادند بی‌رنگ نشان داده شده است؛ بنابراین علاوه بر تشخیص باندهای باریک طیفی که دارای همبستگی بالا با CEC هستند، می‌توان محدوده‌های طیفی که شاخص‌ها دارای عملکرد مناسبی هستند را شناسایی کرد که این می‌تواند در انتخاب تصاویر سنجنده‌هایی



شکل ۵- نمایش دوبعدی مقدار همبستگی (R^2) بین CEC و شاخص‌های باریک باند

Figure 5. 2D correlation plots illustrating the coefficient of determination (R^2) between CEC and indices

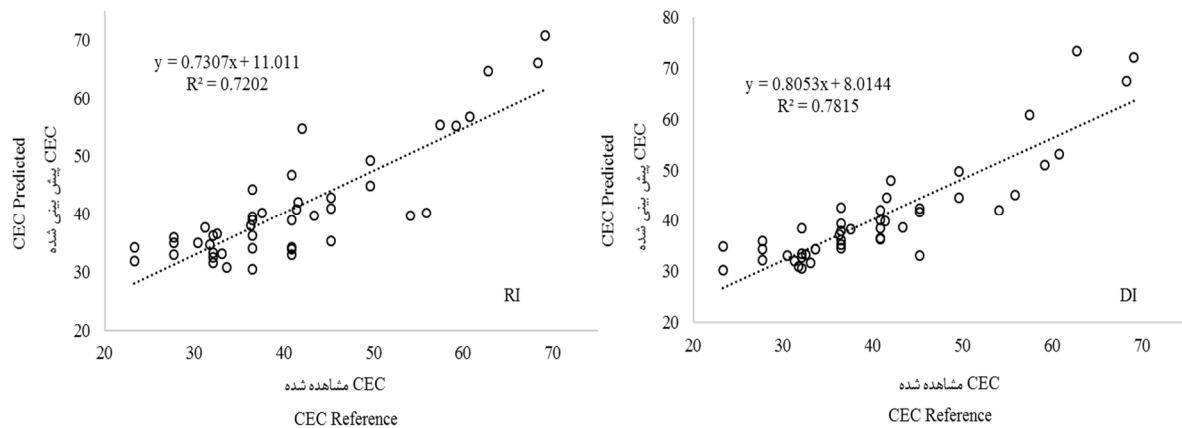
جدول ۵- نتایج مربوط به شاخص‌های طیفی (DI و RI) برای برآورد CEC

Table 5- The results of spectra indices (RI & DI) for CEC

NRMSE _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _{CV}	R ² _{Max}	رابطه رگرسیونی	شاخص‌های طیفی	پیش پردازش
				Regression equation	Spectral parameter	Preprocessing
0.13	5.96	0.72	0.74	CEC= 20852.2RI -20839.0	RI (2148,2149)	طیف بازتابندگی
0.11	5.27	0.78	0.8	CEC= -40467.7DI+23.27	DI (1441,1443)	Reflectance spectra
0.15	7.03	0.61	0.8	CEC=336 RI+1042	RI (1442,736)	
0.11	5.01	0.80	0.82	CEC= 1042 DI+1876	DI (144,2276)	مشتق اول First derivative

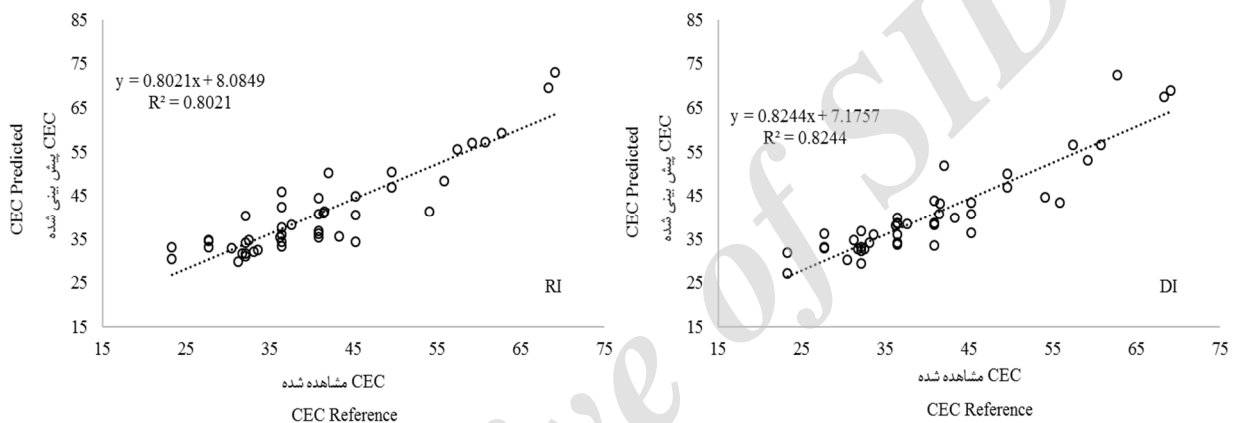
استفاده از مشتق اول بازتابندگی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص‌های باریک باند توانایی زیادی در برآورد CEC دارند و تقریباً دقت آن‌ها یکسان است.

رابطه بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری آزمایشگاهی CEC خاک با استفاده از رگرسیون خطی در حالت استفاده از طیف بازتابندگی به‌عنوان ورودی شاخص در شکل ۶ طیف خام و CEC و حالت



شکل ۶- رابطه بین شاخص‌های باریک باند طیف بازتابندگی و CEC در حالت کالیبراسیون

Figure 6. Relationship between CEC and spectra indices in R mode



شکل ۷- رابطه بین شاخص‌های باریک باند مشتق اول و CEC در حالت کالیبراسیون

Figure 7. Relationship between CEC and first derivative in DR mode

مقادیر همبستگی در باند ۲۲۰۰ نانومتر منطبق با عارضه جذبی مربوط به کانی‌های دارای پیوند AIOH و MgOH است (Heast *et al.*, 2013). دو ناحیه دیگر ۱۴۲۰ و ۱۹۲۰ نانومتر جز نواحی جذب آب به‌شمار می‌روند که محدوده ۱۴۰۰ نانومتر ناشی از پیوند و کششی OH و محدوده جذبی ناشی از پیوند خمشی H-O-H و کششی OH که به‌صورت هم‌آوند (Combination) ظاهر می‌شوند هستند (Clark, 1999).

بنابراین سه مشخصه جذب در این طول‌موج‌ها مشاهده می‌شود که مربوط به مقدار آب موجود در شبکه کانی‌های رسی و رطوبت هیگروسکوپی خاک

بحث

با توجه به نتایج آماری ارائه‌شده در جدول ۲ برای CEC می‌توان گفت داده‌ها دارای توزیع نرمال هستند. با توجه به مقادیر CEC اندازه‌گیری‌شده، احتمالاً کانی‌های موجود در خاک از نوع ایلیت و مونت مریلونیت است (Das, 2008, Chen, 1988) و با توجه به این موضوع می‌توان گفت نمونه‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش دارای پتانسیل تورمی متوسط تا زیاد هستند (Pearring, 1963, Hamberg, 1985).

با توجه به شکل ۲ که نشان‌دهنده ضریب همبستگی به‌دست‌آمده میان مقدار بازتاب طیفی در هر طول‌موج و CEC برای ۴۵ نمونه خاک است، بیشترین

آزمایشگاه شناسایی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار R^2 به دست آمده بین مشتق اول شاخص DI و CEC خاک معادل ۰/۸۲ است. محدوده‌های دارای مقدار همبستگی بالا در هر دو شاخص استفاده شده تقریباً مشابه بوده و در محدوده طیفی ۲۵۰۰-۱۴۰۰ قرار داشت و در محدوده ۱۴۰۰-۴۰۰ نانومتر بین شاخص‌های ایجاد شده با مقدار CEC همبستگی بسیار پایینی مشاهده شد.

بنابراین در روش شاخص‌های طیفی محدوده طیفی SWIR نسبت به محدوده مرئی و NIR برای پژوهش‌های CEC خاک دارای اهمیت بیشتری است (شکل ۵). بر اساس نتایج به دست آمده، شاخص DI نسبت به شاخص RI در حالت ورودی طیف بازتابندگی همبستگی بیشتری با CEC دارد که مربوط به جفت طول موج ۱۴۴۱ و ۱۴۴۳ نانومتر است ولی در حالت مشتق طیف این تفاوت‌ها کمتر می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود در روش شاخص نیز مانند روش PLSR در مقادیر کم، CEC با مشکل برآورد بیشتر از مقدار ممکن روبرو است.

نتیجه‌گیری کلی

در این بررسی قابلیت طیف‌سنجی بازتابی برای برآورد مقدار CEC خاک بررسی و به‌طور کلی نتایج نشان داد که بین CEC و بازتاب طیفی خاک ارتباط بسیار قوی وجود دارد و می‌توان از بازتاب طیفی خاک به‌منظور برآورد CEC استفاده کرد. محدوده‌های جذبی با مراکز ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر به‌عنوان مهم‌ترین محدوده‌های طیفی برای بررسی CEC خاک معرفی شد و شاخص‌های باریک باند ارتباط بیشتری را با مقدار CEC خاک نسبت به PLSR نشان دادند که در مشتق اول شاخص DI بیشترین همبستگی را نشان داد. همچنین محدوده‌های ۲۵۰۰-۱۴۰۰ نانومتر به‌عنوان

بوده و این سه محدوده می‌توانند به‌عنوان مشخصه‌های منحصر به فرد این خاک محسوب شود و اهمیت بسیار زیادی در برآورد CEC خاک دارد.

بر اساس پژوهش‌های انجام شده هر چه مقدار R^2 بیشتر و مقدار RMSE آزمون مدل کمتر باشد آن مدل از مطلوبیت بالاتری برخوردار است (Walvoort and McBratney, 2001). همان‌طور که نتایج جدول ۳ نشان داد، گروه اعتبارسنجی می‌تواند نماینده مناسبی از مجموعه داده‌ها باشد. از طرفی مطابق طبقه‌بندی انجام شده توسط محققین، زمانی که مقادیر RPD (Ratio of Prediction to Deviation) کمتر از ۱/۵ باشد، پیش‌بینی ضعیف، بین ۱/۵ تا ۲، پیش‌بینی قابل قبول و بیش از ۲، پیش‌بینی کاملاً مناسب است (Williams, 2001, Summers et al., 2011). با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، پیش‌بینی مدل برای CEC در حالت استفاده از طیف خام و مشتق اول، قابل قبول و کاملاً مناسب است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار CEC در ارزش‌های کم برای هر دو حالت بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود که البته این ممکن است ناشی از تأثیر دیگر عامل‌های موجود در خاک بر رفتار طیفی آن باشد ولی به‌طور کلی استفاده از روش PLSR برای برآورد مقدار CEC در نمونه‌های دارای CEC پایین دچار برآوردی بیش از اندازه واقعی (Overstimation) است.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود مهم‌ترین باندها برای پیش‌بینی CEC در محدوده‌های NIR و مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR) قرار دارند که با نتایج حاصل از همبستگی تک باندی که در شکل ۲ ارائه شده است همپوشانی زیادی دارد. با استفاده از نتایج حاصل از شاخص‌های طیفی RI و DI، طول موج‌های حساس به CEC اندازه‌گیری شده در

طیف‌سنجی بازتابی به‌عنوان روشی غیرمخرب، سریع، آسان، کم‌هزینه و قابل انجام در منطقه به‌منظور برآورد CEC قابل استفاده است.

سیاسگزاری

این مقاله، حاصل قسمتی از نتایج طرح پژوهشی حمایت از رساله دکتری به شماره ۹۶۰۰۰۴۹۶ است که با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا شده است. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از صندوق اعلام می‌کنند.

References

- Amini, M., K. C. Abbaspour, H. Khademi, N. Fathianpour, M. Afyuni & R. Schulin, 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran, *European Journal of Soil Science*, 56(4): 551-559.
- Bahrami, H. A., S. Mirzaei, A. Darvishi Bolorani & S. K. Darvishzadeh, Alavipana, 2016. Analysis of Dust Storm Effects on Reflectance Spectra of Wheat Canopy, *Journal of Remote Sensing and GIS*, 7(4): 13-26. (In Persian)
- Bayat, H., N. Davatgar & M. Jalali, 2014. Prediction of CEC using fractal parameters by artificial neural networks, *International Agrophys*, 28(2): 143-152.
- Bower, C. A., R. F. Reitmeir & M. Fireman, 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils, *Soil Science*, 73(4): 251-261.
- Bilgili, A.V., H. M. Van Es, F. Akbas, A. Durak & W. D. Hively, 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey, *Journal of Arid Environments*, 74(2): 229-238.
- Blanco, M., J. Coello, H. Iturriaga, S. Maspocho & C. De La Pezuela, 1996. Quantitation of the active compound and major excipients in a pharmaceutical formulation by near infrared diffuse reflectance spectroscopy with fibre optical probe, *Analytica Chimica Acta*, 333(1-2): 147-156.
- Bartholomeus. H. M., M. E. Schaepman, L. Kooistra, A. Stevens, W. B. Hoogmoed & O. S. P. Spaargaren, 2008. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification, *Geoderma*, 145(1-2): 28-36.
- Clark, R. N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, *Manual of Remote Sensing*, 3: 3-58.
- Chen, F. H., 1988. Foundation on expansive soils, Elsevier Science Publishers.
- Das, B. M., 2008. Advanced Soil Mechanics. Taylor and Francis, New York, 370p.
- Gao, B. C. & A. F. H. Goetz, 1995. Retrieval of Equivalent Water Thickness and Information Related to Biochemical Components of Vegetation Canopies from AVIRIS Data, *Remote Sensing of Environment*. 52(3): 155-162.
- Ghorbani, H., H. Kashi, N. Hafezi Moghaddas & S. Emamghozadeh, 2015. Estimation of Soil Cation Exchange Capacity using Multiple Regression, Artificial Neural Networks, and Adaptive Neuro-fuzzy Inference System Models in Golestan Province, Iran, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(6): 763-780.
- Cho, M. A., A. Skidmore, F. Corsi, S. E. Van Wieren & I. Sobhan, 2007. Estimation of green grass/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices

- and partial least squares regression, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(4): 414-424
- Gomez, C., P. Lagacherie & 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.
 - Hosseini Arablu, N., H. Khodaverdiloo, D. SH. Ghorbani & H. R. Momtaz, 2015. Effect of grouping soils based on their organic carbon and clay content on performance of hierarchical pedotransfer functions of soil cation exchange capacity, *Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 4(4): 215-23. (In Persian)
 - Hamberg, D. J., 1985. A simplified method for predicting heave in expansive soils. MS thesis. Colorado State University. Fort Collins, 150 p.
 - Hansena, P. M. & J. K. Schjoerring, 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression, *Remote sensing of environment*, 86(2): 542-553.
 - Haest, M., T. Cudahy, A. Rodger, C. Laukam, E. Martens & M. Caccetta, 2013. Unmixing the effects of vegetation in airborne hyperspectral mineral maps over the Rocklea Dome iron-rich palaeochannel system (Western Australia), *Remote Sensing of Environment*, 129(1): 17-31.
 - Kariuki, P. C., F. Van der Meer & P. N. W. Verhoef, 2003. Cation exchange capacity (CEC) determination from spectroscopy, *Journal of Remote Sensing*, 24(1): 161-167.
 - Zhang, J., Y. Tian, Y. Zhu, X. Yao & W. Cao, 2009. A near-infrared spectral index for estimating soil organic matter content, *Ying yong sheng tai xue bao=The journal of applied ecology*, 20(8): 1896-1904.
 - Knadel, M., B. Stenberg, F. Deng, A. Thomsen & M. H. Greve, 2013. Comparing predictive abilities of three visible-near infrared spectrophotometers for soil organic carbon and clay determination, *Journal of near infrared spectroscopy*, 21(1): 67-80.
 - Martens, H. & T. Naes, 1989. Multivariate calibration, Second edition. John Wiley and Sons Ltd press, Chichester, UK, 419 p.
 - Mousavi, F. & E. Abdi, 2015. Studying the effect of polymeric materials in improving the potential of forest roads soil volume change, *Forest Research and development*, 1(2): 145-153. (In Persian)
 - Nawar, S., H. Buddenbaum & J. Hill, 2015. Estimation of soil salinity using three quantitative methods based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy: a case study from Egypt, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1): 5127-5140.
 - Nelson, J. & D. J. Miller, 1992. Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons press.
 - Pearring, J. R., 1963. A study of basic mineralogical, physical-chemical, and engineering index properties of laterite soils. PhD thesis. Texas A&M University Texas. College Station. TX, USA, 186 p.
 - Rossel, R. V. & A. B. McBratney, 2008. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping, *Digital Soil Mapping with Limited*, 165-172.
 - Summers, D., M. Lewis, B. Ostendorf & D. Chittleborough, 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties, *Ecological Indicators*, 11(1): 123-131.
 - Salehi, A., M. Zainkafsh, G. Zahedi Amiri & R. Marvi Mohajer, 2005. A study of soil physical and chemical properties in relation to tree ecological groups in Nam-Khaneh district of Kheirood-Kenar forest, *Iranian Journal of Natural Resource*, 58(3): 567-578 (In Persian).
 - Stenberg, B. & R. V. Rossel, 2010. Diffuse reflectance spectroscopy for high-resolution soil sensing, *Proximal Soil Sensing*, 29-47.
 - Stenberg, B., R. A. Viscarra Rossel, A. M. Mouazen & J. Wetterlind, 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, *Advances in Agronomy*, 107: 163-215.
 - Savitzky, A. & M. J. E. Golay, 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Square Procedure, *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1638.
 - Tian, Y., J. Zhang, X. Yao, W. Cao & Y. Zhu, 2013. Laboratory assessment of three quantitative methods for estimating the organic matter content of soils in China based on visible/near-infrared reflectance spectra, *Geoderma*, 202:161-170.

- Tucker, C. J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Williams, P. C., 2001. Near-infrared technology in the agricultural and food industries. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, USA, 330 p.
- Waruru, B., K. D. Shepherd, G. M. Ndegwa, P. T. Kamoni & A. M. Sila, 2014. Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy, *biosystems engineering*, 121(1): 177-185.
- Walvoort, D. & A. B. McBratney, 2001. Diffuse reflectance spectrometry as a proximal sensing tool for precision agriculture. Proceedings of Third European Conference on Precision Agriculture. pp. 503-507.
- Waiser, T. H., C. L. S. Morgan, D. J. Brown & C. T. Hallmark, 2007. In situ characterization of soil clay content with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy, *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 389-396.
- Wold, S., M. Sjöström & L. Eriksson, 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 58(2): 109-130.
- Xie, H. T., X. M. Yang, C. F. Drury, J. Y. Yang & X. D. Zhang, 2011. Predicting soil organic carbon and total nitrogen using mid- and near-infrared spectra for Brookston clay loam soil in Southwestern Ontario, Canada, *Canadian Journal of Soil Science*, 91(1): 53-63.
- Yao, X., Y. Huang, G. Shang, C. Zhou, T. Cheng, Y. Tian, W. Cao & Y. Zhu. 2015. Evaluation of six algorithms to monitor wheat leaf nitrogen concentration, *Remote Sensing*, 7(11): 14939-14966.
- Yitagesu, F. A., F. Van der Meer, H. van der Werff & W. Zigterman, 2009. Quantifying engineering parameters of expansive soils from their reflectance spectra, *Engineering Geology*, 105(3-4): 151-160.
- Yu, X., Q. Liu, Y. Wang, X. Liu & X. Liu, 2016. Evaluation of MLSR and PLSR for estimating soil element contents using visible/near-infrared spectroscopy in apple orchards on the Jiaodong peninsula, *Catena*, 137(3): 340-349.

Estimate of soil Cation Exchange Capacity using reflectance spectrometry

F. Mousavi¹, E. Abdi^{*2}, A. Ghalandarzadeh³, H. A. Bahrami⁴, B. Majnounian⁵ and S. Mirzaei⁶

1- Ph.D. Student of Forest Engineering, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

2- Associate Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, I.R. Iran.

4- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R. Iran.

5- Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

6- Ph.D. Student of RS & GIS, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, I.R. Iran.

Received: 28.06.2017

Accepted: 22.01.2018

Abstract

CEC is the most important soil engineering properties used to determine the swelling potential of soil. Measuring CEC of soil is difficult, time-consuming, costly and consuming of dangerous chemical materials. In this study the ability of spectral reflectance to estimate the amount of CEC were investigated. So 45 soil samples were collected from Namkhaneh series of Kheyroud kenar Forest and their reflectance were measured in the range 350-2500 nm in dark room. Then the relationship between CEC and reflectance and first derivative of reflectance were analyzed by single band Pearson correlation, PLSR and two groups of narrowband soil indices (RI, DI). The results of this study showed that narrowband indices have stronger relationship than PLSR and the DI index in case first derivative have highest correlation ($R^2=0.82$, $RMSE=5.01$). In the PLSR method between reflectance and CEC strong relationship was observed while the indices of first derivation reflectance and CEC have stronger relationship than row reflectance. So reflectance can be as a nondestructive, fast, easy and Cost effective method to estimate the CEC.

Keywords: Reflection, Narrowband soil indices, Reflectance, PLSR, CEC.

* Corresponding author:

Email: abdie@ut.ac.ir