

برآورد برخی ویژگی‌های مبنایی خاک توسط طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در استان کردستان

صلاح‌الدین کریمی^۱، مسعود داوری^{۲*}، حسینعلی بهرامی^۳، ابراهیم بابائیان^۴، سید محمدطاهر حسینی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴. محقق پسا دکتری، گروه آب خاک و محیط زیست، دانشگاه اریزونا، آمریکا

۵. مربی، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۵/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۸/۵)

چکیده

طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک به‌عنوان روشی غیر مخرب، سریع، ارزان، دارای حداقل آماده‌سازی نمونه‌ها و بدون آسیب به زیست‌بوم می‌تواند جایگزین روش‌های مرسوم آزمایشگاهی شود. هدف از این پژوهش ارزیابی طیف‌سنجی انعکاسی در برآورد برخی ویژگی‌های خاک‌های دشت‌های کشاورزی قروه و دهگلان در استان کردستان بود. بدین منظور تعداد ۱۲۰ نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری و ویژگی‌های مبنایی آن‌ها در آزمایشگاه با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. آنالیز طیفی خاک‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی زمینی با طول موج ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر انجام شد. پس از ثبت طیف‌ها انواع روش‌های پیش‌پردازش مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس از رگرسیون خطی چندگانه گام‌به-گام، برای پیش‌بینی پارامترهای مورد مطالعه استفاده گردید. با توجه به آماره RPD، بهترین تخمین توابع رگرسیونی پیشنهادی برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۲/۰۲) و تخمین‌هایی قابل قبول برای رس (۱/۷۰)، سیلت (۱/۵۹)، شن (۱/۸۰)، جرم ویژه ظاهری (۱/۵۳) و حقیقی (۱/۵۵)، میانگین قطر ذرات (۱/۵۲) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک (۱/۶۶)، کربن آلی (۱/۷۴) و کربنات کلسیم معادل (۱/۴۹) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی خاک، پیش‌پردازش طیفی، ویژگی‌های خاک، طیف‌سنجی انعکاسی، رگرسیون خطی

مقدمه

خاک سیستمی ناهمگن و پویا با فرآیندها و مکانیسم‌هایی بسیار پیچیده می‌باشد. مطالعه خاک به‌عنوان یک سیستم کامل و یک منبع مهم طبیعی، نیازمند توسعه روش‌هایی تحلیلی است. روش‌های تحلیلی بسیاری جهت برقراری ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اجزای منفرد خاک پیشنهاد شده، لیکن در اغلب آن‌ها اثرات متقابل این اجزاء بر هم لحاظ نشده است. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک زمان‌بر و پرهزینه بوده و همچنین در تعیین این ویژگی‌ها، به‌دلیل تغییرپذیری زمانی و مکانی نیاز به مطالعه‌های صحرائی و نمونه‌برداری‌هایی فراوان می‌باشد؛ لذا در دهه‌های اخیر جستجو برای یافتن روش‌هایی غیرمستقیم، ارزان، سریع و به‌آسانی قابل دسترس، به یکی از اولویت‌های مهم پژوهشی در علوم خاک تبدیل شده است (Shepherd and Walsh, 2002). در سال‌های اخیر، به‌منظور افزایش کارایی تجزیه و تحلیل

رفتار خاک و یا جایگزین نمودن روش‌های دشوار و پرهزینه آزمایشگاهی، از روش‌های دورسنجی استفاده شده است (Nanni and Demattê, 2006). یکی از روش‌های فیزیکی دورسنجی، فن‌آوری طیف‌سنجی خاک می‌باشد. بازتاب طیفی خاک در دامنه‌های طیفی مرئی (Vis^۱) و مادون قرمز نزدیک (NIR^۲) (طول‌موج‌های بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به‌عنوان روش‌هایی جایگزین استفاده می‌شود (Janik et al., 2009). بیشتر این فناوری‌ها غیر مخرب 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 استفاده از این فناوری همچنین می‌توان به‌طور همزمان بیش از ۲۰ ویژگی خاک را با یک اندازه‌گیری در مزرعه و یا در آزمایشگاه برآورد کرد (Kim et al., 2014).

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که بازتاب طیفی خاک به‌وسیله برخی از ویژگی‌های خاک همچون رطوبت، بافت،

می‌باشد. اجزای شیمیایی کانی‌های خاک شامل اکسیژن، سیلیسیوم و آلومینیوم فاقد مشخصه‌های جذبی قوی در گستره مرئی و مادون قرمز نزدیک هستند. حال آن‌که اجزای مهم خاک همچون اکسیدهای آهن، رس و کربن آلی بر منحنی‌های طیفی و مشخصه‌های جذبی تأثیر زیادی دارند. اکسیدهای آهن بر مقدار بازتاب در ناحیه مرئی، کربن آلی و رس نیز بر مقدار بازتاب در ناحیه مادون قرمز تأثیرگذار می‌باشد (Babaeian *et al.*, 2015a, b).

در سال‌های اخیر، بسیاری از پژوهش‌گران از بازتاب طیفی خاک به‌عنوان گزینه‌ای بهینه برای تجزیه و تحلیل رفتار کمی خاک و همچنین برآورد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده کرده‌اند. تمرکز عمده این پژوهش‌ها بر مطالعه ویژگی‌های مبنایی خاک همچون توزیع اندازه ذرات خاک (Ben-Dor *et al.*, 2008; Gomez *et al.*, 2008; and Banin, 1995)، مقدار ماده آلی (Nocita *et al.*, 2013)، مقدار آهک (Gomez *et al.*, 2008; Lagacherie *et al.*, 2008)، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی (Janik *et al.*, 2009; Savvides *et al.*, 2010) و تعیین غلظت برخی عناصر غذایی پر و کم مصرف خاک بوده است (Janik *et al.*, 2009; Gento *et al.*, 2011; Kodaira and Shibusawa, 2013). به‌دلیل وجود هم‌پوشانی طول موج‌های جذبی خاک و نیز به‌دلیل شباهت و انطباق نزدیک این طول موج‌ها با یکدیگر، استفاده از روش‌های آماری و رویکردهای کارآمد مدل‌سازی برای استخراج اطلاعات طیفی خاک ضروری است. تاکنون برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های مبنایی خاک با ویژگی‌های طیفی آن روش‌هایی متعدد مورد استفاده قرار گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) (Viscarra Rossel and Behrens, 2010)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) (Daniel *et al.*, 2003)، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) (Chang *et al.*, 2001) و رگرسیون‌های خطی و غیرخطی (MLR^۲) (Dalal and Henry, 1986) اشاره کرد.

نتایج متفاوت از بهره‌گیری منحنی‌های طیفی جهت برآورد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گزارش شده است (Lagacherie *et al.*, 2008). در بیشتر این پژوهش‌ها ویژگی‌های شیمیایی خاک با استفاده از انعکاس طیفی برآورد شده و نتایج مطلوب نیز حاصل شده است (Gomez *et al.*, 2012; Debaene *et al.*, 2010; Summers *et al.*, 2011).

ساختمان و مقدار ماده آلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Demattê *et al.*, 2006). از دیگر ویژگی‌های مهم خاک که بر مقدار بازتاب طیفی آن مؤثر بوده می‌توان به نوع و فراوانی کانی‌های رسی (کائولینایت، اسمکتایت و ایلایت)، کربنات‌ها، گروه‌های هیدروکسیل آب خاک، ترکیبات آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم اشاره کرد (Babaeian *et al.*, 2015a, b; Workman, 2000). این بدین معنی است که طیف‌های بازتابی می‌تواند در ارزیابی بسیاری از ویژگی‌های خاک ابزاری کارآمد باشد (Stoner and Baumgardner, 1981). کربن آلی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی خاک است که با دقت زیادی توسط تصاویر ماهواره‌ای و فناوری‌های طیف‌سنجی برآورد می‌شود. زیرا کربن آلی خاک در لایه سطحی آن انباشته می‌شود. این ویژگی به‌دلیل وجود پیچیدگی در شیمی مواد آلی، رفتار طیفی متنوعی دارد. مشخصه‌های جذب قوی حاصل از کربن آلی، اغلب در طول موج‌های حدود ۱۷۳۰ نانومتر (به دلیل وجود گروه‌های C-H) و ۲۳۳۰ نانومتر (به دلیل وجود گروه‌های O-H) رخ می‌دهد. این در حالی است که مشخصه‌های جذبی ضعیف‌تر نیز در طول موج‌هایی حدود ۱۱۵۰، ۱۶۷۰، ۱۷۶۵، ۲۰۷۰، ۲۱۱۰، ۲۱۴۰، ۲۱۹۰، ۲۲۸۰، ۲۳۱۰ و ۲۳۹۰ نانومتر مشاهده می‌شود (Ben-Dor *et al.*, 1995). باندهای جذبی مجاور ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر می‌تواند به‌دلیل وجود آب در ترکیبات آلی باشد. افزون بر این، افزایش کربن آلی خاک باعث اثرگذاری بر شکل منحنی طیفی خاک شده و مقدار بازتاب را به‌ویژه در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک (به‌دلیل وجود اسید هومیک تیره) کاهش می‌دهد. کانی‌های کربناتی غالب خاک شامل کلسیت و دولومیت بوده که با تأثیر بر pH خاک باعث جذب یا رهاسازی برخی از عناصر در خاک می‌شوند. کانی‌های کربناته اغلب دارای مشخصه‌های جذبی قوی نزدیک ۲۳۴۵ (به‌دلیل وجود CO₃) و به‌نسبت ضعیف‌تر در مجاورت ۱۸۶۰، ۱۹۹۰ و ۲۱۴۰ نانومتر می‌باشند (Hunt *et al.*, 1977). توزیع اندازه ذرات خاک نیز اثری چشمگیر بر رفتار طیفی خاک دارد. به‌طور کلی، با بزرگ شدن اندازه ذرات و افزایش مسیر عبور نور از بین ذرات خاک، نور بیشتری توسط خاک جذب شده و مقدار بازتاب کاهش می‌یابد. در این وضعیت، مشخصه‌های جذبی واضح‌تر بر روی منحنی‌های طیفی نمایان می‌شوند. در حضور کانی‌هایی روشن همچون سلیکات‌ها و کربنات‌ها، کاهش اندازه ذرات خاک باعث افزایش بازتاب خاک می‌شود. در مورد کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی که اغلب بازتاب طیفی اندکی دارند، مقدار بازتاب طیفی خاک با کاهش اندازه ذرات خاک، کاهش می‌یابد. در مجموع رفتار طیفی خاک تابعی از اجزای تشکیل دهنده آن

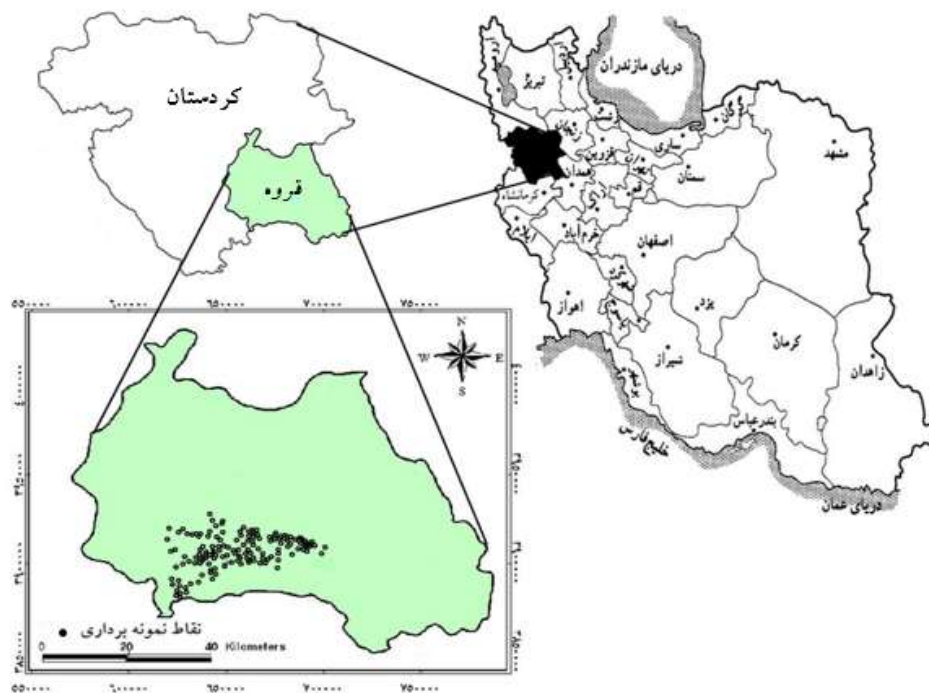
است که یافته‌های حاصل از این پژوهش‌ها بیان‌گر آن است که ویژگی‌هایی از خاک که مرتبط با ساختار جامد خاک و سطوح آن‌ها بوده (همچون مقادیر رس، سیلت، شن، ماده آلی، هدایت الکتریکی و pH) را می‌توان با دقت بسیار بالایی توسط داده‌های طیفی خاک برآورد کرد (Viscarra Rossel *et al.*, 2006). لیکن یافته‌ها نشان داده‌اند که ویژگی‌های تحت تأثیر خلل و فرج خاک (همچون جرم ویژه ظاهری، رطوبت اشباع و ضریب آبگذری اشباع خاک) را نمی‌توان با بهره‌گیری از داده‌های طیفی خاک با دقت زیادی پیش‌بینی کرد (Tranter *et al.*, 2008). از آنجایی که تاکنون پژوهش‌هایی اندک راجع به استفاده از داده‌های طیفی در برآورد ویژگی‌های مبنایی خاک‌های ایران انجام شده است؛ بنابراین، در این پژوهش تلاش شد امکان استفاده از طیف‌سنجی مرئی مادون قرمز نزدیک جهت پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های اینسپتی‌سول استان کردستان ارزیابی شود.

تعداد ۱۲۰ نمونه خاک دست‌خورده از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری منطقه مورد مطالعه به‌صورت تصادفی برداشت شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. پس از آماده‌سازی این نمونه‌ها، توزیع اندازه ذرات خاک با روش هیدرومتری، جرم ویژه ظاهری با روش کلوخه، جرم ویژه حقیقی به روش پیکنومتر، مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی-بلاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور و کربنات کلسیم معادل خاک (CCE) نیز به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک اندازه‌گیری شد (Klute, 1986; Page *et al.*, 1982). میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک نیز با بهره‌گیری از روش شیرازی و بورسما محاسبه شد (Shirazi and Boersma, 1984).

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن

منطقه مورد مطالعه بخش از اراضی دشت‌های کشاورزی شهرستان‌های قروه و دهگلان واقع در استان کردستان می‌باشد (شکل ۱). این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی حد فاصل



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری در دشت‌های کشاورزی شهرستان‌های قروه و دهگلان، استان کردستان

رفتار طیفی خاک و پیش‌پردازش‌های طیفی

بازتاب طیفی نمونه خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از دستگاه اسپکترومتر زمینی (FieldSpec@3, ASD, FR, USA) گروه خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری شد (شکل (۲)). بدین منظور تعداد ۱۲۰ نمونه خاک هوا خشک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و منحنی‌های طیفی آن‌ها در دامنه‌های مرئی - مادون قرمز نزدیک (۲۵۰۰ - ۳۵۰ نانومتر) با روش‌های استاندارد طیف‌سنجی در تاریک خانه اندازه‌گیری شد (Viscarrá Rosset, 2008). اندازه‌گیری‌های طیفی با بهره‌گیری از پیستولی مجهز به لنز ۸ درجه که میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتی‌متر ایجاد می‌کند، انجام شد. منبع نور شامل یک لامپ هالوژن ۱۵۰ وات با زاویه استقرار ۴۵ درجه نسبت به محور قائم بود. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری مقدار بازتابش و حذف آشفته‌گی‌ها طیفی و واسنجی دستگاه در حین اندازه‌گیری، به ازای هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) که در وضعیتی مشابه با اندازه‌گیری نمونه‌های خاک مستقر شده بود، انجام گردید. منحنی‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار RS۳ موجود بر روی رایانه قابل حمل متصل به دستگاه ثبت شد. برای هر نمونه خاک ۵ اسکن تهیه شده که در مجموع ۶۰۰ منحنی طیفی ثبت گردید. با کمک نرم‌افزار ViewSpec یک میانگین از منحنی‌های طیفی برای هر نمونه خاک محاسبه شد. سپس این منحنی‌های طیفی 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؛ به‌گونه‌ای که در گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر هر منحنی طیفی شامل ۲۰۵۰ بازتاب طیفی (۲۰۵۰ طول موج) می‌باشد.

پیش‌پردازش داده‌های طیفی

هدف اصلی پیش‌پردازش داده‌های طیفی، حذف عوامل خارجی و استفاده بهینه از داده‌های طیفی طی فرآیند تخمین است. به دلیل وجود آشفته‌گی‌های زیاد طیفی (نویز) در طول موج‌های ۳۹۹-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۵۱ نانومتر، این محدوده از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت (Gomez et al., 2008). همچنین، به منظور حذف آشفته‌گی 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 10.3 Unscambler و 3.1 ParleS انجام شد. شایان ذکر است که در این پژوهش از انواع مختلف روش‌های پیش‌پردازش همچون فیلتر میانه، فیلتر ساویتزکی و گلای (Savitzky - Golay)، نرمال‌سازی بر اساس میانگین، متغیر نرمال استاندارد (SNV^۱)، تصحیح پخشیده چندگانه (MSC^۲)، مشتق اول همراه فیلتر ساویتزکی و گلای و مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی و گلای استفاده شد. براساس نتایج روش اعتبار سنجی متقابل و ارزیابی دقت 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. شکل (۳) نمودار طیف‌های مرئی-مادون قرمز نزدیک نمونه‌های خاک را پس از انجام پیش‌پردازش (مشتق اول+ فیلتر ساویتزکی و گلای) نشان می‌دهد. شایان ذکر است که منحنی حذف پیوستار، منحنی است که براساس خطی محذب و فرضی که دو انتهای یک مشخصه جذب طیفی را به یکدیگر وصل می‌کند، کمی می‌شود. با بهره‌گیری از رابطه (۱) می‌توان منحنی حذف پیوستار را محاسبه کرد (Babaeian et al. 2015a, b).

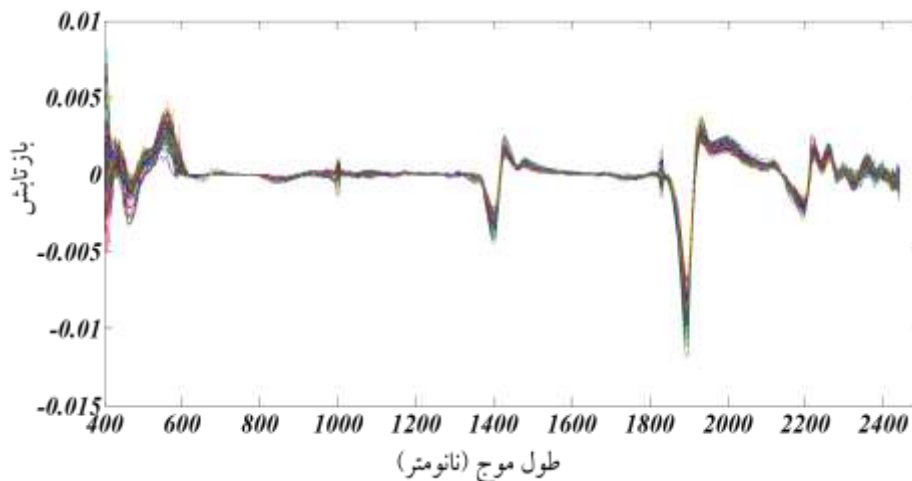
$$R_{CR(\lambda_i)} = \frac{R_{\lambda_i}}{R_{CL(\lambda_i)}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

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



شکل ۲. تصویری از دستگاه بازتاب‌سنج طیفی خاک (FieldSpec@3, ASD, FR, USA)

1. Standard normal variate
2. Multiplicative signal correction



شکل ۳. منحنی‌های مشتق اول Savitzky-Golay طیف خام بازتاب‌های طیفی خاک‌های مورد مطالعه

بودن مدل، ۳۰ - ۲۰ دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشان دهنده ضعیف بودن مدل است. شاخص انطباق بیان کننده درجه‌ای از دقت بوده که در آن مقادیر تخمینی به دست آمده است. در مقایسه با ضریب تبیین (R^2) که بیانگر همبستگی بین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای است، شاخص انطباق درجه‌ای را بیان می‌کند که در آن پیش‌بینی‌های مدل عاری از خطا می‌باشند (Willmott, 1981). شاخص درصد انحراف نسبی که اغلب در مطالعات طیف‌سنجی استفاده می‌شود، به سه گستره $1/4 <$ ، $1/4 - 2$ و $2 >$ که به ترتیب معرف تخمین ضعیف، قابل قبول و قوی می‌باشند، طبقه‌بندی شده است (Chang and Laird, 2002; Viscarra Rossel, 2008). برای انجام محاسبات از محیط نرم افزار SPSS 23 استفاده شد. در زیر بیان ریاضی آماره‌های ذکر شده آورده شده است:

$$ME = \frac{1}{N - P} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N - P} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}_{Obs}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (\text{رابطه ۶})$$

همبستگی بین متغیرها، اشتقاق توابع و دقت آزمایشی آنها

اساس بیشتر روش‌های آماری بر فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها است. بنابراین، پس از محاسبه آماره‌های توصیفی، وضعیت نرمال بودن داده‌ها برای هر ویژگی خاک به کمک آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌دار ۵ درصد ارزیابی شد. متغیرهای دارای توزیع غیرنرمال، با بهره‌گیری از تبدیل مناسب نرمال شدند. سپس، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، میزان ارتباط بین مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شد. به منظور فراهم آوردن امکان ارزیابی صحیح دقت توابع پیشنهادی، داده‌های آزمایشگاهی و طیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده به دو گروه داده‌های واسنجی ($n=80$) و اعتبارسنجی ($n=40$) تقسیم شدند. سپس با استفاده از روش رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام رابطه‌ای ریاضی بین متغیرها به دست آمد. برای ارزیابی دقت نتایج حاصل، از آماره‌هایی همچون میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص انطباق (d) و درصد انحراف نسبی (RPD) استفاده شد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، همان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است که براساس میانگین مشاهدات نرمال شده است (Liu et al., 2008) و هرچه مقدار آن کم‌تر باشد، نشان دهنده صحت بیشتر در برآورد متغیر است. لازم به ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان دهنده دقیق بودن مدل، ۲۰ - ۱۰ درصد مناسب

تخمینی، P تعداد پارامترها و N نیز تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک

در جدول (۱)، نتایج آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی به تفکیک از هم ارائه شده است.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

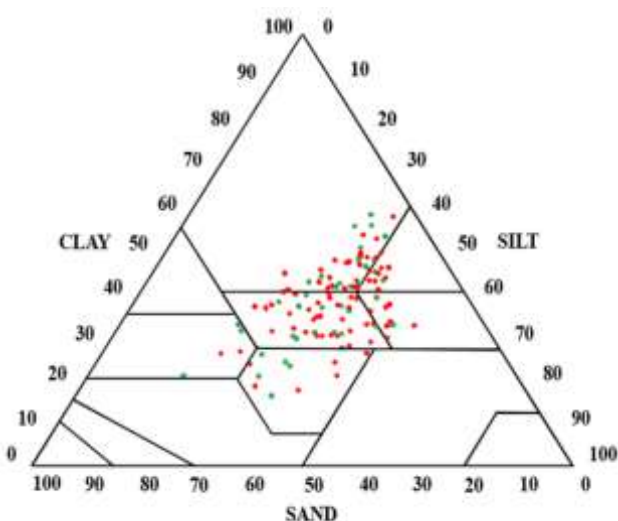
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|]^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

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 و

جدول ۱. توصیف آماری ویژگی‌های خاک در دو سری داده‌ها واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی			واسنجی			ویژگی‌ها
انحراف معیار	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	
۱۰/۰۵	۵۵/۴۸	۱۶/۰۵	۸/۱۱	۵۷/۳۶	۱۷/۲۲	رس (/)
۵/۲۴	۴۳/۸۹	۲۲/۱۵	۷/۳۲۱	۵۴/۷۹	۲۲/۰۴	سیلت (/)
۱۲/۹۹	۶۱/۵۷	۸/۰۳	۱۰/۰۲	۵۲/۰۸	۴/۲۶	شن (/)
۰/۰۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۸۸	۰/۰۰۵	میانگین هندسی قطر ذرات (mm)
۲/۸۹	۲۰/۵۵	۸/۶۳	۳/۱	۲۰/۷۷	۶/۸۹	انحراف معیار هندسی قطر ذرات
۰/۱۳۶	۱/۹۷	۱/۴	۰/۱۵	۲/۰۵	۱/۲۹	جرم ویژه ظاهری (g/cm ³)
۰/۰۴۹	۲/۷۸	۲/۵۹۶	۰/۰۵۳	۲/۸۱۶	۲/۵۰۳	جرم ویژه حقیقی (g/cm ³)
۰/۵۱	۳/۰۲	۰/۵۵	۰/۴۸	۲/۳۴	۰/۲۵	ماده آلی (/)
۴/۱۴	۲۵/۳۵	۸/۲۹	۴/۶۰	۲۵/۹۹	۷/۸۴	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol _e /kg)
۱۶/۷	۵۸/۷۵	۰/۱۲۵	۱۷/۹۱	۶۲/۵۷	۰/۱۲	کربنات کلسیم معادل (/)

دارای گستره نسبتاً وسیعی می‌باشند. واضح است هرچه گستره ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه وسیع‌تر باشد، توابع اشتقاق یافته از اعتبار بیشتری برای استفاده در دیگر انواع خاک‌ها برخوردار می‌باشند.



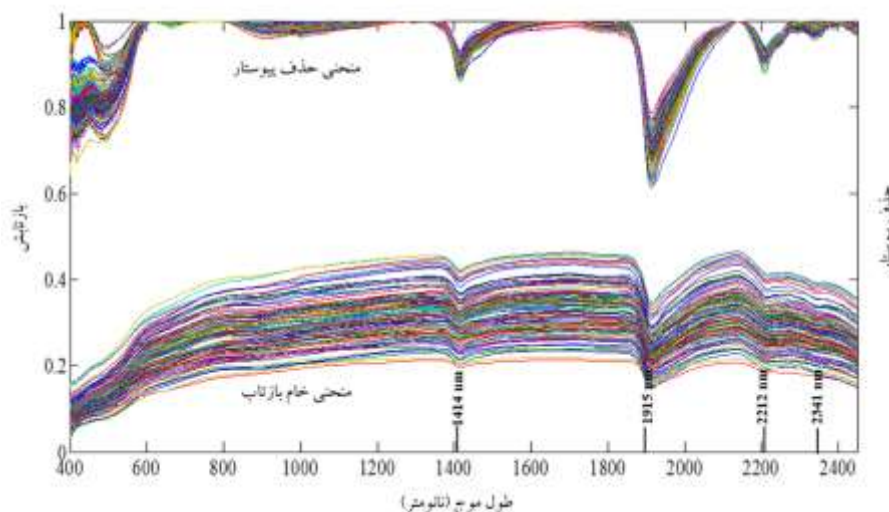
شکل ۴. توزیع کلاس‌های بافتی خاک‌های مورد مطالعه به ازای سری

داده‌های مدل‌سازی (●) و آزمون (●)

همان‌گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود مقدار رس و شن خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب در دامنه‌هایی از ۵۷/۳۶-۱۶/۰۵ و ۴/۲۶-۶۱/۵۷ درصد متغیر می‌باشد. میانگین جرم ویژه ظاهری، ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی کل نمونه خاک‌ها نیز به ترتیب معادل ۱/۶۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۱/۳۷ درصد و ۱۵/۵۱ سانتی مول بر کیلوگرم به دست آمد. به دلیل حضور کربنات‌ها، pH خاک‌های مورد مطالعه خنثی تا کمی قلیایی (۷/۱-۷/۹۲) است. با توجه به جدول (۱) و شکل (۴)، نمونه خاک‌های مورد مطالعه از نظر کلاس بافتی دارای تنوع زیادی بوده و هفت کلاس بافتی را شامل می‌شوند. در شکل (۴) نیز پراکنش کل نمونه خاک‌های مورد مطالعه در مثلث بافتی خاک آورده شده است. شکل (۴) بیان‌گر فراوانی خاک‌های ریز و متوسط بافت در منطقه مورد مطالعه می‌باشد؛ زیرا که بافت‌های رس و لوم رسی، کلاس‌های بافتی غالب منطقه را تشکیل می‌دهند. توزیع و گستره ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بین محدوده انتخاب شده داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی انطباقی مناسب وجود دارد (جدول (۱) و شکل (۴)). افزون بر این همان‌گونه که جدول (۱) نشان می‌دهد تمامی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه

در شبکه کانی‌های رس می‌باشد (Clark *et al.*, 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 (Stenberg *et al.*, 2010). به‌طور معمول، کربنات کلسیم باعث افزایش مقدار بازتاب از خاک و کربن آلی و رطوبت خاک باعث کاهش مقدار آن می‌شود. بررسی‌ها نشان داده‌اند که مشخصه‌های جذبی مجاور طول موج ۲۳۴۱ نانومتر، می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های CO₃ موجود در کانی‌های کربناته باشد (Gomez *et al.*, 2008).

در شکل (۵) میانگین منحنی‌های خام و حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌ها ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود منحنی‌های خام طیفی دارای یک برآمدگی در طول موج‌های ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر و همچنین سه مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵ و ۲۲۱۲ نانومتر می‌باشند. این مشخصه‌های طیفی در منحنی‌های حذف پیوستار به‌صورت واضح‌تری نشان داده شده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک (۱۴۱۴ نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رسی (۱۹۱۵) و پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آهن، آلومینیوم و منیزیم (۲۲۱۲ نانومتر)

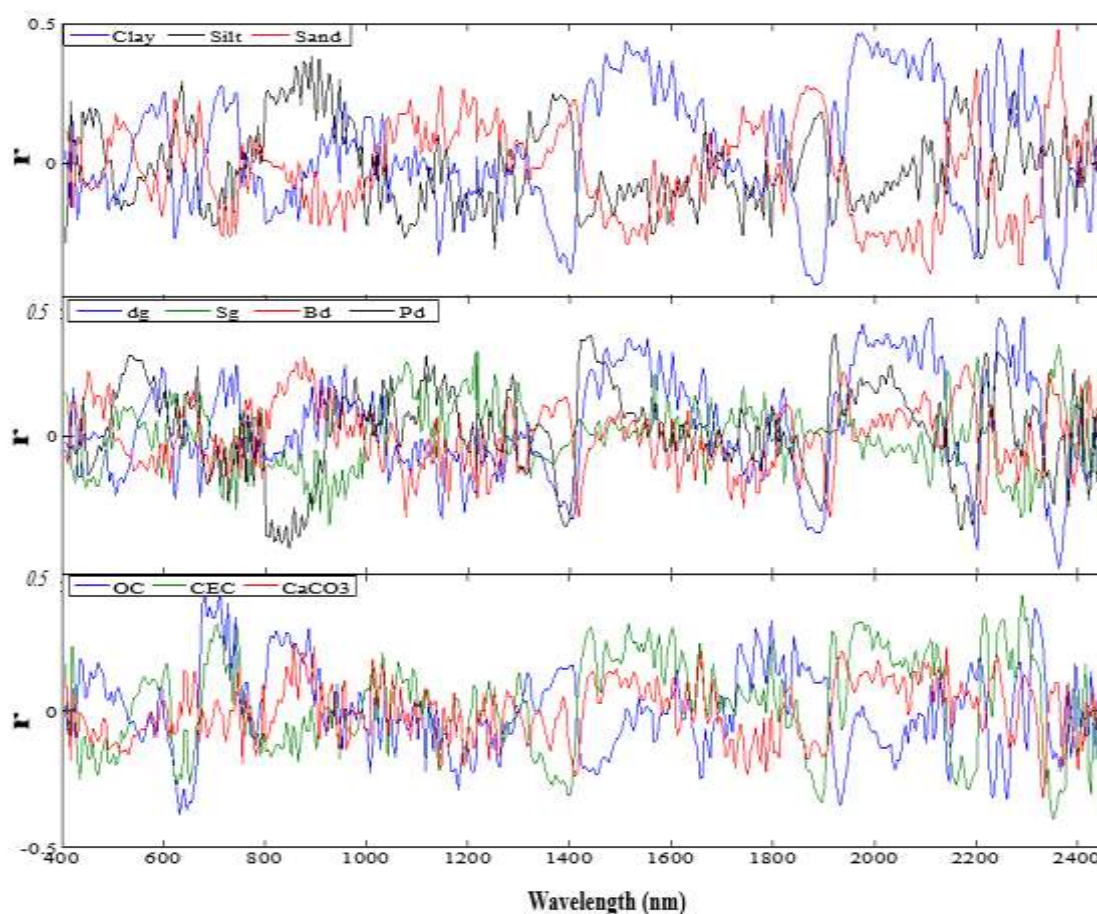


شکل ۵. میانگین منحنی‌های خام و حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه، موقعیت مشخصه‌های جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۱ نانومتر بر روی شکل مشخص شده است.

۸۴۷ ($r = -0.41^{**}$) نشان دادند. همچنین با توجه به نتایج حاصل، بالاترین ضریب همبستگی کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم معادل خاک در طول موج‌های ۷۱۲ ($r = 0.43^{**}$)، ۲۲۹۲ ($r = 0.43^{**}$) و ۲۳۳۲ ($r = -0.32^{**}$) مشاهده گردید. شایان ذکر است که وجود چنین همبستگی‌های بالایی بین ویژگی‌های مبنایی فیزیکی و شیمیایی خاک و مقادیر بازتاب طیفی توسط دیگر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (Bilgili *et al.*, 2010; Somers *et al.*, 2010; Santra *et al.*, 2009; Babaeian *et al.*, 2015a, b). از آنجا که ویژگی‌های مبنایی فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف دارای همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌داری می‌باشند، این امکان وجود دارد که بتوان از روی داده‌های بازتاب طیفی خاک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را برآورد کرد. این بدین معنی است که می‌توان توابعی رگرسیونی طیفی را برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پیشنهاد کرد.

تجزیه و تحلیل و همبستگی بین متغیرها

در شکل (۶) ضریب همبستگی پیرسون (r) بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک با مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج، از گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر ارائه شده است. با توجه به این شکل، بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی در گستره مرئی - مادون قرمز نزدیک همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد. نتایج نشان داده‌اند که توزیع اندازه ذرات خاک به‌ازای طول موج‌های مختلف دارای همبستگی‌های مثبت و منفی می‌باشند. بیشینه ضریب همبستگی برای رس، سیلت و شن به‌ترتیب در طول موج‌های ۱۹۶۷، ۸۹۲ و ۲۳۶۲ معادل 0.46^{**} ، 0.38^{**} و 0.48^{**} به‌دست آمد. بالاترین همبستگی معنی‌دار میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک نیز معادل -0.49^{**} و 0.38^{**} بوده که هر دو در طول موج ۲۳۶۲ نانومتر مشاهده شد. این در حالی است که جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک بالاترین همبستگی معنی‌دار را به‌ترتیب در طول موج‌های ۱۹۱۲ ($r = -0.3^{**}$) و



شکل ۶. ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موجهای مختلف

توابع رگرسیونی پیشنهادی

توابع رگرسیونی اشتقاق یافته به منظور برآورد برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از بازتاب طیفی در طول موج‌های مؤثر، در جدول (۳) آورده شده است. نتایج حاصل از این جدول نشان می‌دهد مقادیر R^2 و NRMSE توابع پیشنهادی برای تخمین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه، به ازای داده‌های مدل‌سازی به ترتیب بین ۰/۶۰ تا ۰/۸۷ و ۱/۲۴ تا ۱۹/۰۴ درصد متغیر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر رس، سیلت، شن، جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی و کربنات کلسیم معادل با دقتی بیشتر ($R^2 \geq 0.70$) در مقایسه با جرم ویژه حقیقی ($R^2 = 0.60$) برآورد می‌شود. این در حالی است که با توجه به نتایج حاصل از آماره NRMSE ارائه شده در جدول (۳)، توابع پیشنهادی در برآورد متغیرهای مورد مطالعه درصد شن، سیلت، جرم ویژه ظاهری و حقیقی و میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک از دقت خوب ($NRMSE \leq 10$) و در برآورد متغیرهای درصد رس، ظرفیت

تبادل کاتیونی، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل از برآوردی مناسب ($NRMSE = 10-20$) برخوردار می‌باشند. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند آن دسته از ویژگی‌های خاک که در ارتباط با بخش جامد خاک می‌باشند (مانند رس، سیلت، شن، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد کربنات کلسیم)، برخلاف ویژگی‌هایی از خاک که با منافذ خاک در ارتباط می‌باشند می‌توانند با دقت بیشتری توسط داده‌های طیفی برآورد شوند (Mutuo et al., 2006; Minasny et al., 2008; Cecillon et al., 2009). این در حالی است که ساختمان خاک، که به‌طور عمده در ارتباط با اندازه، فراوانی و نحوه اتصال منافذ خاک با یکدیگر بوده، معمولاً به‌صورت ضعیفی برآورد می‌شود.

نتایج حاصل از توابع اشتقاق یافته در این پژوهش همچنین نشان دادند که به ازای کل پارامترهای اندازه‌گیری شده، طول موج‌های مؤثر بدست آمده در محدوده مرئی شامل ۴۶۷-۴۵۲ نانومتر و در محدوده‌های مادون قرمز نزدیک نیز به ترتیب شامل ۱۲۶۷-۹۳۷ و ۲۳۸۷-۲۲۳۷ نانومتر می‌باشد.

جدول ۲. توابع رگرسیونی اشتقاق یافته به منظور برآورد برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

توابع رگرسیونی	R ^۲	NRMSE
Clay=18.206+4000(2.592R ₆₁₇ -10.658R ₇₃₇ +3.528R ₁₁₈₂ -4.666R ₁₂₀₂ +1.22R ₂₁₁₂ -0.492R ₂₁₆₇ +1.052R ₂₁₇₇ +1.723R ₂₂₄₇ +0.662R ₂₃₀₇ -0.228R ₂₄₄₂)	۰/۷۰	۱۱/۹۳
Silt=58.309+4000(-0.062R ₄₀₇ +0.372R ₄₆₇ -4.487R ₇₆₇ -1.116R ₉₅₇ -0.395R ₁₀₀₂ -0.759R ₁₀₇₂ -6.438R ₁₂₅₂ +0.79R ₁₃₇₂ -1.227R ₁₅₆₂ -1.337R ₁₇₉₇ -1.716R ₁₈₃₇ -0.381R ₂₃₂₂ -0.387R ₂₃₅₇)	۰/۸۲	۸/۱۵
Log Sand= 1.794+400 (-1.219R ₄₆₇ +10.813R ₆₆₂ +14.068R ₆₇₇ -3.644R ₈₆₇ +7.399R ₈₉₇ +3.01R ₁₀₀₇ +3.12R ₁₀₇₂ +8.205R ₁₂₁₂ +8.771R ₁₂₅₂ +3.858R ₁₈₁₇ +1.088R ₁₈₆₇ -4.829R ₂₁₁₂ +3.576R ₂₁₄₂ -1.896R ₂₂₅₂)	۰/۷۹	۶/۴۸
d _g ^{0.3} =1.933+400(6.188R ₇₄₇ +3.367R ₈₈₇ -0.092R ₁₀₀₂ +1.388R ₁₁₀₂ +2.049R ₁₁₅₇ -2.173R ₁₂₀₂ +2.743R ₁₂₅₇ +2.178R ₁₂₆₂ -4.115R ₁₂₆₇ -0.99R ₁₄₇₂ +2.654R ₁₅₃₇ -1.436R ₁₇₁₇ +1.714R ₁₇₅₂ +0.86R ₂₁₁₂ +0.483R ₂₂₅₇ +0.267R ₂₄₁₂)	۰/۸۰	۷/۵۶
Log δg=2.355+40(0.612R ₄₃₂ +0.739R ₄₆₂ -2.466R ₄₆₇ +1.245R ₅₀₇ -7.245R ₇₁₇ -9.92R ₇₉₇ +3.323R ₁₀₀₇ +14.014R ₁₂₀₂ +8.574R ₁₂₁₂ -19.268R ₁₂₆₂ +4.967R ₁₇₉₇ +7.463R ₂₁₄₇ -2.431R ₂₁₇₇ -2.6674R ₂₂₆₂ +1.219R ₂₃₅₂ -0.908R ₂₃₆₇)	۰/۸۷	۳/۲
Bd ⁻¹ =0.868+12.208R ₄₅₂ -11.47R ₄₉₇ +53.856R ₈₇₇ +70.698R ₉₈₂ +52.489R ₁₀₈₇ +80.198R ₁₂₂₇ -216.633R ₁₂₃₇ +151.296R ₁₂₅₇ -134.596R ₁₆₁₂ +53.785R ₁₇₄₂ +118.505R ₁₈₂₂ +27.688R ₂₁₉₂ +38.649R ₂₂₃₇ -14.807R ₂₃₈₇)	۰/۷۴	۴/۷۳
Pd=2.661+118.242R ₆₆₇ +157.107R ₇₃₇ -338.48R ₇₇₇ +51.162R ₉₅₇ +106.122R ₁₁₁₇ +84.459R ₁₆₉₇ +39.077R ₁₇₅₂ -12.381R ₂₃₃₇	۰/۶۰	۱/۲۴
OC=1.529+400(-0.132R ₄₅₇ -0.182R ₄₆₇ +0.401R ₄₇₇ +3.0484R ₇₀₇ +1.051R ₉₄₂ -1.074R ₁₀₀₇ +0.93R ₁₀₆₇ -0.772R ₁₀₆₇ +1.169R ₁₀₉₂ -2.585R ₁₁₈₂ +3.514R ₁₁₈₇ -3.7R ₁₂₀₇ -3.468R ₁₂₆₇ +1.51R ₁₃₁₇ -1.565R ₁₆₈₂ -0.639R ₂₃₀₂)	۰/۷۹	۱۶/۲۳
CEC=-1.539+4000(-0.118R ₄₃₂ +0.19R ₄₄₇ +0.26R ₅₀₂ -0.503R ₅₁₂ +1.877R ₇₁₇ +0.838R ₉₅₇ -0.746R ₁₀₄₂ -3.065R ₁₃₃₇ -1.541R ₁₅₈₇ -1.582R ₁₆₆₇ +1.308R ₁₆₇₇ -3.162R ₁₆₈₇ +1.046R ₂₀₈₂ -0.678R ₂₁₅₇ +0.414R ₂₃₀₂)	۰/۷۹	۱۳/۵۴
CCE ^{0.5} =9.084+400(-0.516R ₄₃₇ -10.184R ₈₀₇ +4.828R ₈₅₇ +19.47R ₁₂₁₇ +11.428R ₁₇₇₂ +0.877R ₁₉₂₇ +3.627R ₂₁₄₂ -1.399R ₂₃₀₇ -1.074 R ₂₃₇₂ -0.955R ₂₄₀₇)	۰/۷۲	۱۹/۰۴

R_w درصد بازتاب طیفی در طول موج dg و δg به ترتیب میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک (میلی‌متر)، Bd جرم ویژه ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، Pd جرم ویژه حقیقی خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و OC درصد کربن آلی خاک و CCE درصد کربنات کلسیم معادل در خاک می‌باشد.

دقت آزمایشی توابع رگرسیونی پیشنهادی

در جدول (۳)، نتایج دقت آزمایشی توابع رگرسیونی پیشنهادی در برآورد ویژگی‌های مبنایی اندازه‌گیری شده برای سری داده‌های آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، توابع پیشنهادی در پیش‌بینی مقدار سیلت، کربن آلی، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک حالت کم‌برآوردی و برای سایر ویژگی‌های مورد-مطالعه دارای حالت بیش‌برآوردی می‌باشند. با توجه به نتایج، بیشینه حالت کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی به ترتیب برای سیلت و کربنات کلسیم معادل به دست آمد. در مجموع مقدار میانگین ME برای کل ویژگی‌های مبنایی مورد مطالعه معادل ۰/۱۵ می‌باشد. همچنین بیشینه مقدار NRMSE برای کربنات کلسیم (برابر ۲۶/۸۱ درصد) و کمینه مقدار آن نیز برای جرم ویژه حقیقی خاک (معادل ۱/۱۴ درصد) محاسبه شد. مقدار میانگین NRMSE نیز برای ویژگی‌های مبنایی مورد مطالعه، معادل

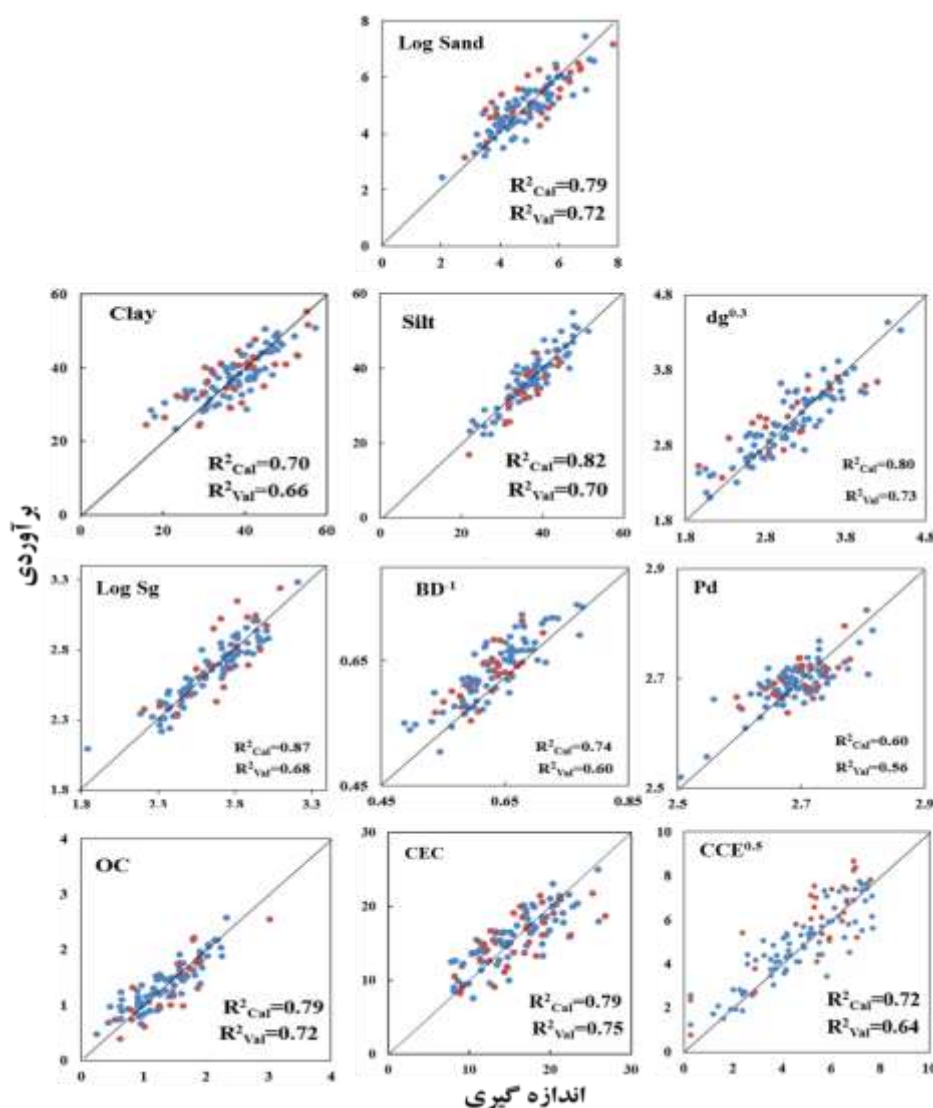
۱۲/۰۳ به دست آمد، که در مجموع نشان دهنده مناسب بودن مدل‌های پیشنهادی برای متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به آماره RPD، بهترین تخمین توابع رگرسیونی پیشنهادی برای ظرفیت تبادل کاتیونی (RPD=۲/۰۲)، تخمین‌های متوسط برای رس، سیلت، شن، جرم ویژه ظاهری و حقیقی، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل (RPD=۱/۴-۲) محاسبه شد. مقدار متوسط شاخص d نیز معادل ۰/۸۸ محاسبه شده که بیان‌گر دقت قابل قبول توابع رگرسیونی طیفی در پیش‌بینی ویژگی‌های مبنایی مورد مطالعه می‌باشد؛ با توجه به این آماره بیشترین دقت برای ظرفیت تبادل کاتیونی (d=۰/۹۲) و کمترین دقت نیز برای جرم ویژه حقیقی خاک (d=۰/۸۳) به دست آمد. شایان ذکر است تمامی این تفسیرها بر اساس نتایج تجزیه‌های آزمایشگاهی بوده که خود دارای خطا می‌باشد.

جدول ۳. دقت آزمایشی توابع رگرسیونی پیشنهادی به منظور برآورد ویژگی‌های خاک با استفاده از سری داده‌های آزمون (N=۴۰)

آماره‌ها	Clay	Silt	Log Sand	$d_g^{0.3}$	$\text{Log } \sigma_g$	Bd^{-1}	Pd	OC	CEC	$CCE^{0.5}$
ME	۱/۱۲	-۱/۰۷	۰/۰۵	-۰/۲۵	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	-۰/۱۱	۰/۴۱	۱/۳۵
NRMSE	۱۴/۱	۸/۱۵	۱۰/۹	۱۲/۲۸	۵/۴۱	۴/۵۳	۱/۱۴	۲۲/۷۶	۱۴/۲۶	۲۶/۸۱
d	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۸۷
R^2	۰/۶۶	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۶۴
RPD	۱/۷	۱/۵۹	۱/۸	۱/۵۲	۱/۶۶	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۷۴	۲/۰۲	۱/۴۹

هندسی قطر ذرات خاک (۰/۷۳)، شن و کربن آلی (۰/۷۲)، سیلت (۰/۷۰)، انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک (۰/۶۸) و رس (۰/۶۶) بیشترین مقدار می‌باشد. این بدین معنی است که توابع رگرسیونی پیشنهادی در برآورد ویژگی‌های ذکر شده دارای تخمین بهتری می‌باشند.

در شکل (۷)، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی توابع پیشنهادی در برآورد برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل و جدول (۳) نیز مشاهده می‌شود، از میان ویژگی‌های مبنایی، مقادیر آماره R^2 داده‌های آزمون برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۷۵)، میانگین



شکل ۷. نمودار دقت نتایج واسنجی (●) و اعتبارسنجی (●) مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده

برآورد برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ارزیابی شد. پس از ثبت داده‌های طیفی و میانگین‌گیری از آن‌ها، منحنی حذف پیوستار و پیش پردازش داده‌های طیفی انجام شد. نتایج نشان داد بهترین روش پیش پردازش داده‌های طیفی، روش مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلای می‌باشد. با توجه به همبستگی بالا و معنی‌داری ویژگی‌های مبنایی اندازه‌گیری شده خاک با مقادیر بازتاب طیفی آن‌ها، توابعی رگرسیونی برای برآورد این ویژگی‌ها پیشنهاد شد. به منظور ارزیابی دقت توابع پیشنهادی از آماره‌های مختلفی همچون میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص انطباق (d) و درصد انحراف نسبی (RPD) استفاده شد. نتایج ارزیابی این آماره‌ها نشان داد که مقدار میانگین ME و NRMSE برای کل ویژگی‌های مبنایی مورد مطالعه معادل به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۱۲/۰۳ درصد می‌باشد. بهترین تخمین توابع رگرسیونی پیشنهادی برای ظرفیت تبادل کاتیونی ($RPD=2/02$)، تخمین‌های متوسط برای رس، سیلت، شن، جرم ویژه ظاهری و حقیقی، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل (۲- $RPD=1/4$) محاسبه شد. مقدار متوسط شاخص d نیز معادل ۰/۸۸ محاسبه شده که بیان‌گر دقت قابل قبول توابع رگرسیونی پیشنهادی در پیش‌بینی ویژگی‌های مبنایی مورد مطالعه می‌باشد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از داده‌های طیفی خاک می‌تواند به‌عنوان روشی غیرمستقیم برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قرار گیرد. هر چند با توجه به ماهیت تجربی بودن توابع رگرسیونی طیفی و تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک در دیگر مناطق (همچون خاک‌های شور، خاک‌های آلی، خاک‌های آهکی و گچی که اثراتی متفاوت بر رفتار طیفی خاک دارند)، ضروری است این توابع برای سایر مناطق و خاک‌های متنوع‌تر استخراج و مورد ارزیابی قرار گیرد.

REFERENCESE

- 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.
- Babaeian, E., Homae, M., Vereecken, H., Montzka, C., Norouzi, A. A., & van Genuchten, M. T. (2015b). A Comparative Study of Multiple Approaches for Predicting the Soil-Water Retention Curve: Hyperspectral Information vs. Basic Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 79, 1043-1058.
- Ben-Dor, E., Banin, A. (1995). Near-infrared analysis

as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 364-372.

Bilgili, A. V., Van Es, H. M., Akbas, F., Durak, A., & Hively, W. D. (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.

Cecillon, L.C., Barthesb, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A. and Brun, J. (2009). Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil*

Demattê *et al.* (2014)، در پژوهشی بین مقادیر اندازه‌گیری شده برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و مقادیر برآورد شده آن‌ها با استفاده از داده‌های طیفی، تطابق بالایی مشاهده کردند. این محققین ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) را برای رس به ترتیب ۰/۸۳ و ۴/۰۳ درصد، برای سیلت به ترتیب ۰/۳۲ و ۵/۰۶ درصد، برای شن به ترتیب ۰/۷۰ و ۵/۶۷ درصد، برای ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب ۰/۶۴ و ۱/۹۱ سانتی‌مول بر کیلوگرم، برای ماده آلی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۳۱ درصد و برای کربنات کلسیم معادل به ترتیب معادل ۰/۶۴ و ۰/۷۰ درصد گزارش کردند. شایان ذکر است که Bilgili *et al.* (2010) نیز استفاده از داده‌های طیفی را برای برآورد برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پیشنهاد کرده‌اند. Babaeian *et al.* (2015) در پژوهشی، افزون بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برخی از ویژگی‌های مبنایی خاک را نیز با استفاده از داده‌های طیفی پیش‌بینی کردند. این محققین نشان دادند که ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) توابع پیشنهادی برای رس به ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۳۹ درصد، برای سیلت به ترتیب معادل ۰/۴۱ و ۰/۰۴ درصد، برای شن به ترتیب معادل ۰/۷۰ و ۰/۰۵۶ درصد، برای جرم ویژه ظاهری به ترتیب معادل ۰/۵۷ و ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، برای ماده آلی به ترتیب معادل ۰/۶۹ و ۰/۱۴ درصد و برای میانگین هندسی قطر ذرات خاک نیز به ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۰۴ میلی‌متر می‌باشد. در مجموع این محققین استفاده از ویژگی‌های طیفی خاک را برای دسترسی به برآوردهای غیرمستقیم و نسبتاً دقیق از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه پیشنهاد کردند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی - مادون قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر) برای

- Science*, 60, 770–784.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A. and Vergo, N. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95, 12653–12680.
- Daniel, K.W., Tripathi, N.K. and Honda, K. (2003). Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients in soils of Lop Buri (Thailand). *Australian Journal of Soil Research*, 41, 47–59.
- Debaene, G., Niedzwiecki, J., & Pecio, A. (2010). Visible and near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. *Polish Journal of Agronomy*, 3, 3-9.
- Demattê, J. A. M., Bellinaso, H., Romero, D. J., & Fongaro, C. T. (2014). Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. *Scientia Agricola*, 71(6), 509-520.
- Demattê, J., Sousa, A.A., Alves, M.C., Nanni, M.R., Fiorio, P.R., Campos, R.C. (2006). Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. *Geoderma*, 135, 179-195.
- Genot, V., Colinet, G., Bock, L., Vanvyve, D., Reusen, Y. and Dardenne, P. (2011). Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19, 117-138.
- Gomez, C., Lagacherie, P., & Coulouma, G. (2012). Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. *Geoderma*, 189, 176-185.
- Gomez, C., Lagacherie, P., Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148, 141-148.
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3), 501-513.
- Janik, L.J., Forrester, S.T. and Rawson, A. (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. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97, 179-188.
- Kim, I., Pullanagari, R.R., Deurer, M., Singh, R., Huh, K.Y., Clothier, B.E. (2014). The use of visible and near-infrared spectroscopy for the analysis of soil water repellency. *European Journal of Soil Science*, 65, 360-368.
- Klute, A. (1986). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods (No. Ed. 2). *American Society of Agronomy, Inc.*
- Kodaira, M., Shibusawa, S. (2013). Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. *Geoderma*, 199, 64-79.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Netto, J.M and Robbez-Masson, J.M. (2008). Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112, 825-835.
- Liu, X., Xu, J., Zhang, M., Si, B., and Zhao, K. (2008). Spatial variability of soil available Zn and Cu in paddy rice fields of China. *Environmental Geology*, 55, 1569-1576.
- Minasny, B., McBratney, A., Tranter, G., Murphy, B. (2008). Using soil knowledge for the evaluation of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for predicting soil physical and mechanical properties. *European Journal of Soil Science*, 59, 960-971.
- Mutuo, P.K., Shepherd, K.D., Albrecht, A. and Cadisch, G. (2006). Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 1658-1664.
- Nanni, M. R., & Demattê, J. A. M. (2006). Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 393-407.
- Nocita, M., Stevens, A., Noon, C., van Wesemael, B. (2013). Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 199, 37-42.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. *American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin*, 1159.
- Savvides, A., Corstanje, R., Baxter, S.J., Rawlins, B.J. and Lark, R.M. (2010). The relationship between diffuse spectral reflectance of the soil and its cation exchange capacity is scale dependent. *Geoderma*, 154, 353–358.
- Shepherd, K.D., Walsh, M.G. (2002). Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 988-998.
- Shirazi, M.A., Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 142-147.
- Stenberg, B., Rossel, R. A. V., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Chapter five-visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 107, 163-215.
- Stoner, E.R., Baumgardner, M. (1981). Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1161-1165.
- Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B., and Chittleborough, D. (2011). Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*, 11(1), 123-131.
- Viscarra Rossel, R.A.V. (2008). ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90, 72–83.

Viscarra Rossel, R., McGlynn, R., McBratney, A. (2006). Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137, 70-82.

Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.

Workman, J., (2000). Handbook of Organic Compounds: UV-Vis and NIR spectra. Academic press, pp. 77-197.