

برآورد کمی اجزای بافت خاک با استفاده از طیفسنجی در ناحیه مرئی - مادون قرمز نزدیک

زهرا رزقی^۱، مهدی همایی^۲ و علی اکبر نوروزی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ^۲ استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران و ^۳ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۴

چکیده

آگاهی از بافت به دلیل تأثیر مستقیم آن بر دیگر ویژگی‌های خاک برای مطالعات کشاورزی، منابع طبیعی، هیدرولوژی و غیره از اهمیت زیادی برخوردار است. تعیین بافت خاک در پهنه‌های گسترده مستلزم صرف وقت و هزینه‌های زیاد است. به همین دلیل، پژوهشگران به دنبال راه‌هایی برای تعیین این ویژگی مهم خاک در مقیاس‌های وسیع هستند. یکی از این روش‌ها، استفاده از بازتاب طیفی خاک سطحی است. در این روش، انتخاب روش واسنجی، دقت اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک را به شدت از خود متأثر می‌سازد. در این پژوهش، عملکرد دو روش رگرسیونی کمینه مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) برای شناسایی روش مناسب برای ارزیابی شن، سیلت و رس خاک مقایسه شد. به همین منظور، ۵۰ نمونه خاک از استان تهران گردآوری و به‌عنوان مجموعه داده برای روش واسنجی و اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها با پنج سطح رطوبتی صفر، پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی و با استفاده از اسپکترومتر زمین‌ی با محدوده اندازه‌گیری ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر اسکن شدند. طیف‌ها نیز با استفاده از سه روش پیش پردازش SG، FD-SG و Normal+SG تصحیح شد. نتایج ضریب تبیین (R^2) حاصل از ارزیابی متقابل نشان داد که مدل PLSR عملکردی بهتر از PCR دارد. روش پیش پردازش Normal+SG برای بافت لوم رسی و روش SG برای بافت لوم رس شنی برآورد بهتری از خصوصیات مورد اندازه‌گیری نشان داد. مقدار R^2 برای رس ۰/۷۴، ۰/۸۱، ۰/۹۷ و ۰/۸۷ به ترتیب در رطوبت‌های صفر، پنج، ۱۵ و ۲۰ درصد در بافت لوم رسی و ۰/۹۵ و ۰/۶۱ در سطوح صفر و پنج درصد در بافت لوم رس شنی به دست آمد. سیلت با مقدار R^2 ۰/۶۷، در رطوبت پنج درصد در بافت لوم رسی و ۰/۹۷ در رطوبت ۲۰ درصد در بافت لوم رس شنی برآورد بهتری داشت. شن نیز با R^2 برابر با ۰/۸۶ و ۰/۷۲ به ترتیب در رطوبت‌های پنج و ۱۰ درصد در بافت لوم رسی برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: اسپکترومتر، بازتاب طیفی، پیش‌پردازش طیفی، رگرسیون کمینه مربعات جزئی، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی

مقدمه

کاتیون‌ها در مطالعات کشاورزی، منابع طبیعی و غیره بسیار مهم است. بافت خاک یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که به گونه‌ای مستقیم

برآورد کمی اجزای خاک مانند فراوانی نسبی اندازه ذرات خاک، مقدار ماده آلی و غلظت آنیون‌ها و

نمونه‌های واسنجی در مدل‌سازی بسیار مؤثر است. همچنین، این پژوهشگران تخمین ضعیف درصد رس خاک را به تنوع بالای منطقه از لحاظ بافت خاک مرتبط دانستند. Summers و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی ۳۰۰ خاک در منطقه جنوب استرالیا به ارزیابی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در برآورد کربن آلی، مقدار رس، اکسیدهای آهن و کربنات‌های خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب تعیین برای درصد رس، مقدار کربن آلی، اکسیدهای آهن و کربنات‌های خاک به ترتیب ۰/۶۶، ۰/۵۷، ۰/۶۱ و ۰/۶۹ است و مقادیر RMSE نیز به ترتیب ۳/۱۳، ۰/۳۵، ۰/۲۳ و ۲/۹ درصد گزارش شد.

به دلیل خطاهای مختلف در حین طیف‌سنجی آزمایشگاهی، طیف اصلی باید تحت پردازش‌هایی برای حذف آثار نویزهای تصادفی، خطاهای پس‌زمینه‌ای نمونه‌ها، تغییرات مسیری طیفی قرار گیرد (Fearn و همکاران، ۲۰۰۹). به علاوه، تغییر در خصوصیات ساختمانی نمونه‌های خاک، شرایط کاری و وضعیت دستگاه طیف‌سنج، سبب ایجاد خطاهایی در روابط بین طیف‌های بازتابی و پارامترهای خاک می‌شود. لذا، از روش‌های معمول پیش‌پردازش طیفی برای حذف یا تعدیل این آثار استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل هموارسازی ساویتسکی-گولای (۱۹۶۴)، فن تحلیل حذف پیوستار (CR)، مشتق‌گیری، نرمال‌سازی، $MSCt^1$ ، $SNVt/a^2$ است. نتایج پژوهشگران نشان داد که می‌توان با استفاده از بازتاب طیفی بسیاری از خصوصیات خاک را با دقت قابل قبولی برآورد کرد.

بررسی مطالعات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که پژوهشی در رابطه با برآورد اجزای بافت خاک‌ها در شرایط مختلف رطوبتی با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک انجام نگرفته است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، بررسی توانایی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک برای برآورد فراوانی نسبی شن، سیلت و رس خاک‌های سطحی استان تهران در پنج سطح رطوبتی می‌باشد. همچنین،

دیگر ویژگی‌های مهم خاک، از جمله حساسیت به فرسایش، زهکشی، ظرفیت نگهداری آب، مواد آلی و ظرفیت برای شستشوی مواد غذایی و مواد آلاینده را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hassink و همکاران، ۱۹۹۳). از سوی دیگر، اندازه‌گیری این ویژگی‌ها با استفاده از روش‌های معمول آزمایشگاهی در پهنه‌های گسترده زمان‌بر و پرهزینه است. به همین منظور، امروزه تلاش‌های زیادی در راستای استفاده از روش طیف‌سنجی به جای روش‌های مرسوم برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جریان است (Ehsani و همکاران، ۲۰۰۱).

طی چند دهه اخیر، در پژوهش‌های انجام یافته از انعکاس طیفی خاک در دامنه‌های مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (SWIR) (طول موج بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به عنوان روشی سریع، ارزان و بدون آسیب به زیست بوم برای تخمین ویژگی‌های خاک استفاده شده است. تمرکز این پژوهش‌ها بر مطالعه ویژگی‌های پایه‌ای خاک شامل توزیع اندازه ذرات، مقدار ماده آلی، مقدار آهک، هدایت الکتریکی و تعیین غلظت برخی عناصر پر مصرف و کم مصرف گیاه در خاک بوده است (Ben-Dor و Banin، ۱۹۹۵؛ Brown، ۲۰۰۷؛ Debaene و همکاران، ۲۰۱۰). Janik و همکاران (۲۰۰۷)، Minasny و همکاران (۲۰۰۸) و Tranter و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مادون قرمز میانی یا MIR (۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) و روش PLSR، مقدار رطوبت حجمی خاک را برآورد کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت برآوردها در پتانسیل‌های ماتریک (مکش) زیاد بسیار بیشتر از پتانسیل‌های ماتریک اندک است.

Debaene و همکاران (۲۰۱۰) از روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک برای تخمین مقدار کربن آلی خاک، اسیدیته خاک و مقادیر منیزیم، پتاسیم، فسفر و درصد رس خاک سطحی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین ضریب تبیین برای درصد کربن آلی خاک (۰/۶۵) و منیزیم خاک (۰/۶۹) به دست آمد، در حالی که ضرایب تبیین برای سایر پارامترها ضعیف بود. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری کردند که طراحی مدل واسنجی و تعداد

¹ Multiplicative Scattering Correction tech

² Standard Normal Variate pretreatment tech/analysis method

تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. هر منحنی طیفی دارای تفکیک طیفی برابر یک نانومتر بود.

به دلیل وجود آشفتگی‌های زیاد طیفی در طول موج‌های ۳۹۹-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۵۱ نانومتر، این محدوده از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت (Gomez و همکاران، ۲۰۰۸). به منظور حذف هرچه بیشتر این آشفتگی‌ها در طیف‌های خاک (همچون رفتار غیر خطی نوارها، نرمال‌سازی طیف‌ها، فیلتر و بازسازی طیفی) و ارتقای کیفی داده‌ها، روش‌های مختلف پیش‌پردازش شامل فیلتر ساویتزکی-گولای (SG)، نرمال‌سازی بر اساس میانگین به علاوه فیلتر ساویتزکی-گولای (SG+ Normal) و مشتق اول به همراه فیلتر ساویتزکی-گولای (FD-SG) انجام شد.

پس از انجام پیش‌پردازش‌ها، ۸۰ درصد از نمونه‌ها برای واسنجی و ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد که از مدل رگرسیون کمینه مربعات جزئی (PLSR^۱) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR^۲) با اعتبارسنجی متقابل برای برآورد مقادیر شن، سیلت و رس استفاده شد. مراحل توصیف‌های آماری متغیرها، با استفاده از نرم‌افزار SPSS و پیش‌پردازش طیف‌ها و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Unscrambler X (Trial) 10.4 انجام شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری اجزای بافت خاک: بر اساس تحلیل آماری انجام شده، مشخص شد که خصوصیات مورد بررسی خاک منطقه (اجزای خاک)، دارای خصوصیات تمایل به مرکز، پراکنش و توزیع به قرار جدول ۱ است. بدین ترتیب مقادیر میانگین اجزای مورد بررسی خاک برای بافت لوم رسی شامل: رس، شن و سیلت به ترتیب ۳۲/۸۹، ۳۴/۵۲ و ۳۲/۵۹ و برای بافت لوم رسی شنی ۲۵/۷۵، ۵۵/۱۷ و ۱۸/۶۸ درصد، انحراف معیار بافت لوم رسی ۳/۷۶، ۶/۲۹ و ۷/۱۴ و برای بافت

تأثیر روش‌های مختلف پیش‌پردازش داده‌های طیفی در مدل‌سازی از دیگر اهداف این پژوهش بود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در استان تهران با وسعت ۱۳۶۸۸ کیلومتر مربع انجام شد. این استان در طول جغرافیایی بین ۵۳-۵۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی بین ۳۶-۳۴ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی واقع شده است. تعداد ۵۰ نمونه خاک از لایه سطحی (اعماق ۳۰-۰ سانتی‌متری) به صورت تصادفی از برخی از شهرستان‌های استان تهران جمع‌آوری شد. منطقه مطالعاتی به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ ارائه شده است. پس از گردآوری نمونه‌های خاک و هوا خشک کردن آن‌ها، خاک‌ها از الک دو میلی‌متر رد شدند. فراوانی نسبی اندازه ذرات خاک (PSD) به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های خاک در آون (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) خشک و ۵۰ گرم از هر نمونه خاک با سطوح پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی رطوبت‌دهی شده و برای تحلیل طیفی مورد استفاده قرار گرفت.

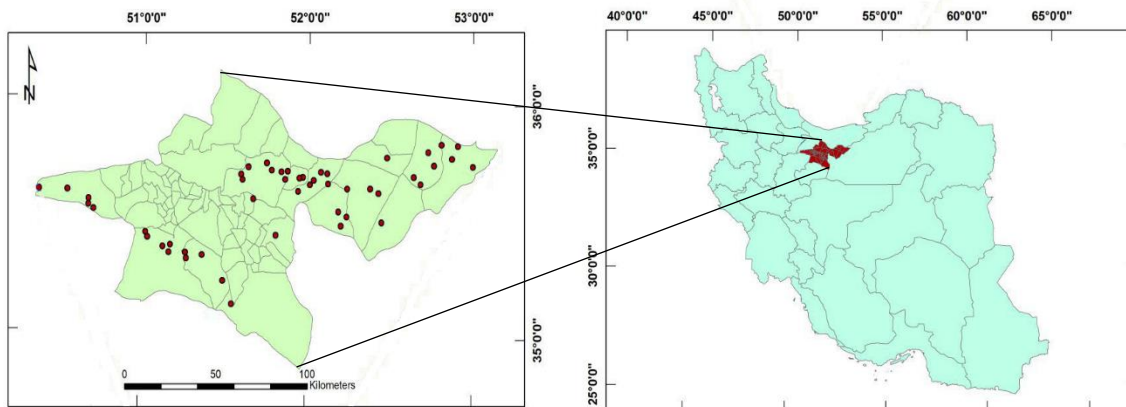
به منظور اندازه‌گیری بازتاب طیفی نمونه‌های خاک، از دستگاه اسپکتروادیومتر زمینی (FieldSpec ASD, FR, USA, 3) با دامنه طول موج ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر استفاده شد. اندازه‌گیری‌های طیفی به کمک پیستول مجهز به لنز هشت درجه که میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتی‌متر بر روی نمونه خاک ایجاد می‌کند، انجام شد. منبع نور نیز شامل یک لامپ هالوژن ۱۵۰ وات با زاویه استقرار ۴۵ درجه از محور قائم بود. به منظور ثبت اندازه‌گیری‌ها به صورت مقدار بازتابش و حذف آشفتگی‌های طیفی (نویز)، به ازای قرائت از هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) در شرایطی کاملاً یکسان با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد. میانگین و انحراف معیار منحنی‌های طیفی مربوط به تکرارهای هر یک از نمونه‌های خاک (یعنی میانگین ۱۵ اسکن) با نرم‌افزار ViewSpec محاسبه و به ازای هر نمونه خاک، یک منحنی طیفی در تجزیه و

¹ Partial Least Squares Regression

² Principal Component Regression

رسی ۱۲/۵۰، ۲۱/۵۰ و ۲۳/۵۰ و بافت لوم رس شنی ۱۳، ۱۹ و ۱۸ بوده است.

لوم رس شنی ۳/۷۹، ۴/۹۸ و ۴/۴۵، چولگی بافت لوم رسی ۰/۴۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۵-، برای بافت لوم رس شنی ۰/۵۵، ۰/۴۵ و ۰/۸۸-، دامنه مقادیر برای بافت لوم



شکل ۱- نمای کلی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری

جدول ۱- آماره‌های پراکندگی، توزیع و تمایل به مرکز مربوط به خصوصیات نمونه‌های خاک منطقه

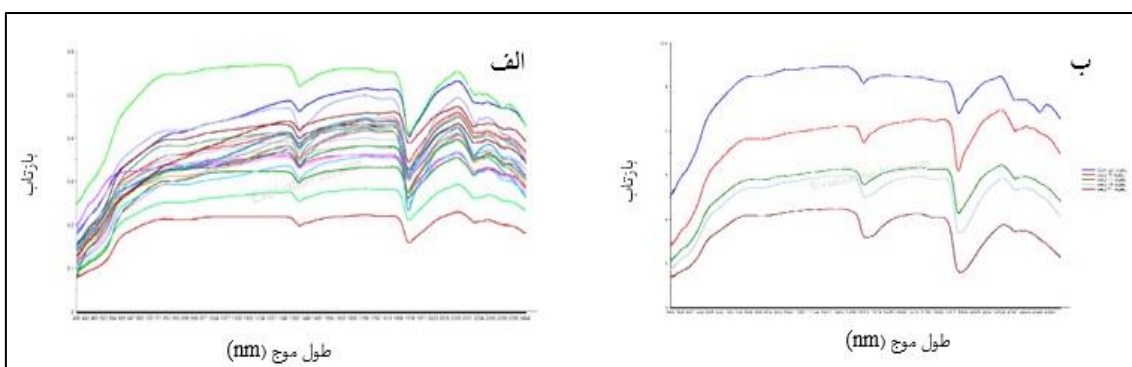
| لوم رس شنی | | | لوم رسی | | | بافت |
|------------|--------|--------|---------|--------|--------|------------|
| رس | سیلت | شن | رس | سیلت | شن | اجزای بافت |
| ۲۷ | ۲۷ | ۲۷ | ۲۳ | ۲۳ | ۲۳ | تعداد |
| ۲۱ | ۸ | ۴۵ | ۲۷ | ۲۰/۵۰ | ۲۳ | کمینه |
| ۳۴ | ۲۶ | ۶۴ | ۳۹/۵۰ | ۴۴ | ۴۴/۵۰ | بیشینه |
| ۲۵/۷۴۶ | ۱۸/۶۷۹ | ۵۵/۱۶۶ | ۳۲/۸۹۱ | ۳۲/۵۸۷ | ۳۴/۵۲۱ | میانگین |
| ۱۴/۳۷۷ | ۱۹/۸۵۳ | ۲۴/۷۶۹ | ۱۴/۱۵۸ | ۵۱/۰۳۸ | ۳۹/۶۲۵ | واریانس |
| ۰/۵۵۱ | -۰/۸۸۴ | -۰/۴۵۲ | ۰/۴۳۲ | -۰/۰۴۶ | ۰/۰۲۶ | چولگی |
| -۰/۱۶۸۱ | ۰/۱۸۵۶ | -۰/۳۴۴ | -۰/۷۰۵ | -۱/۳۱۲ | -۰/۱۵۸ | کشیدگی |

به علت فرکانس ارتعاشات پایه مولکول آب شامل کشش متقارن و نامتقارن پیوند O-H و خمش O-H است (Hunt, ۱۹۷۷). اما ویژگی جذبی رس در ۲۲۰۰ نانومتر است. کانی‌های خاک نور را در ناحیه‌های مرئی-مادون قرمز نزدیک و میانی جذب می‌کنند. پاسخ طیفی کانی‌های رسی در نتیجه ارتعاش مولکول‌های آب ساختمانی، گروه‌های هیدروکسیل، چارچوب سیلیکات و کاتیون‌های اکتاهدرال، تتراهدرال و بین لایه‌ای است (Farmer و Russell, ۱۹۶۴). اکسیدهای آهن در محدوده مرئی و کربنات‌ها در ۲۳۰۰ نانومتر قابل مشاهده‌اند (Clark, ۱۹۹۹؛ Viscarra Rossel و همکاران، ۲۰۰۶). همان‌طور که در شکل ۲- ب، مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار رطوبت در یک نمونه خاک از میزان بازتاب طیفی کاسته می‌شود که این امر به دلیل جذب طیف تابشی

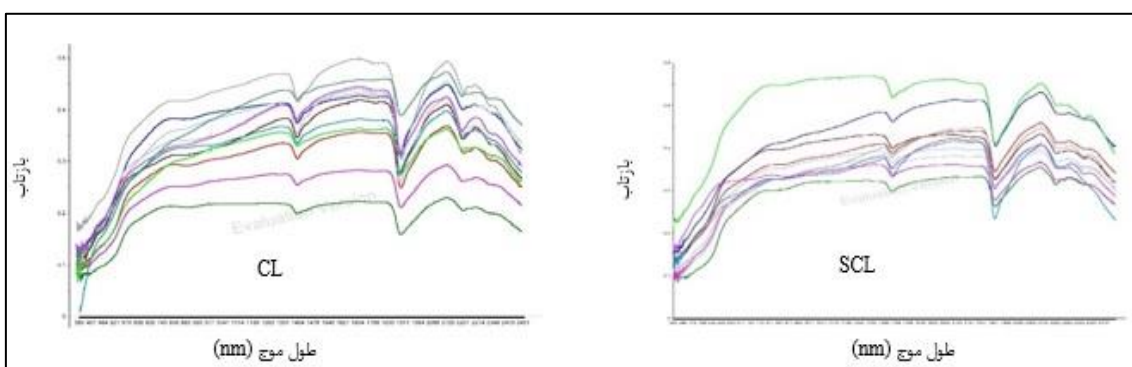
ویژگی‌های طیفی خاک‌ها: نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های مبنایی خاک نشان داد که نمونه‌های خاک شامل دو بافت لوم رسی (CL) و لوم رس شنی (SCL) است. در مورد تأثیر بافت خاک بر بازتاب طیفی می‌توان مطرح کرد، به دلیل آن‌که خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی رطوبت کمتری دارند، بازتاب طیفی بالاتری نسبت به خاک‌های ریزبافت دارند (Babaieian و همکاران، ۲۰۱۴). شکل ۲- الف، طیف انعکاسی محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک به دست آمده در نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. شکل کلی همه طیف‌ها در همه خاک‌ها تقریباً مشابه بود. چهار مشخصه جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۰ نانومتر بر روی منحنی‌های خام طیفی مشاهده شد، اما اختلافاتی در میزان انعکاس وجود دارد. ویژگی جذبی آب در ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر

(۱۹۶۵) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش اندازه ذرات، مقدار بازتاب کاهش می‌یابد. این در حالی است که Viscara Rossel و Bratney (۱۹۹۸) مقادیر بازتاب پایین را با افزایش مقدار رس به دست آوردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که این اختلاف می‌تواند به دلیل اختلاف در خصوصیات کانی‌شناسی نمونه‌های خاک باشد.

به وسیله مولکول‌های آب اتفاق می‌افتد. از سویی، هر چه مقدار رس خاک بیشتر باشد، عمق نوارهای جذبی بیشتر خواهد بود. زیرا خاک‌های رسی رطوبت بیشتری را در خود نگه می‌دارند. شکل ۳، طیف بازتابی نمونه‌های خاک را برای دو بافت لوم رسی و لوم رسی شنی را در رطوبت یکسان نشان می‌دهد. بیشترین مقدار بازتاب در بافت لوم رسی ۰/۵۶ و در بافت لوم رسی شنی ۰/۴۹ به دست آمد. Bower و Hank



شکل ۲- الف) داده‌های طیف بازتابی خام و ب) داده‌های طیفی یک نمونه خاک در رطوبت‌های مختلف



شکل ۳- امضا طیفی نمونه‌های خاک در دو بافت CL و SCL در رطوبت پنج درصد وزنی

استفاده از پیش‌پردازش طیف‌ها در مقایسه با شرایط بدون پیش‌پردازش به دست آوردند. بر اساس جدول ۲، مدل‌های مبتنی بر روش پیش‌پردازش SG برای بافت لوم رسی و روش Normal-SG برای بافت لوم رسی بهترین دقت را داشتند. برای نمونه‌های واسنجی نیز بهترین مدل برازش داده شده بر اساس کمینه ریشه میانگین مربعات خطای برآورد، مدل PLSR معرفی شد.

تأثیر روش‌های مختلف پیش‌پردازش بر مدل برآورد: نتایج حاصل از جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهند که روش‌های مختلف پیش‌پردازش تأثیری قابل توجه بر روی مدل‌های رگرسیونی دارند. در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی بدون پیش‌پردازش، عملکرد مدل‌ها با SG، FD-SG، و SG+Normal بهبود یافت. پژوهشگران دیگری همچون، Kuśnierek (۲۰۱۱)، Gras و همکاران (۲۰۱۴)، Nawar و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش کرده‌اند که نتایج بهتری با

جدول ۲- ضریب تبیین انواع روش‌های مختلف پیش‌پردازش در مدل PCR

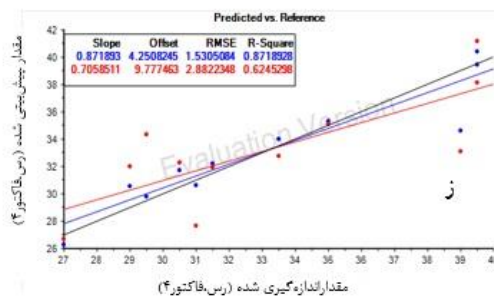
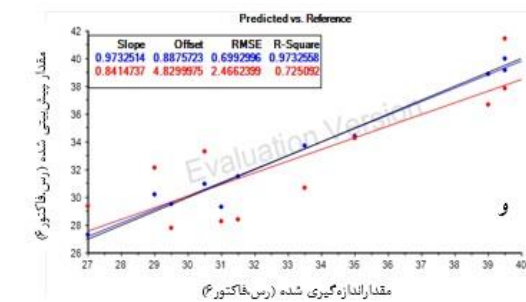
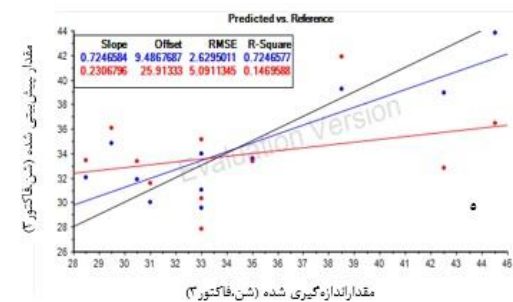
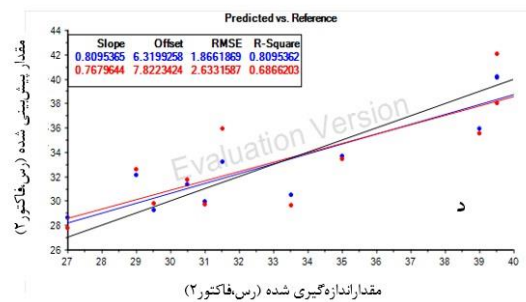
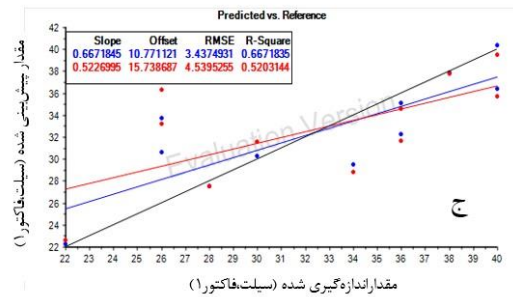
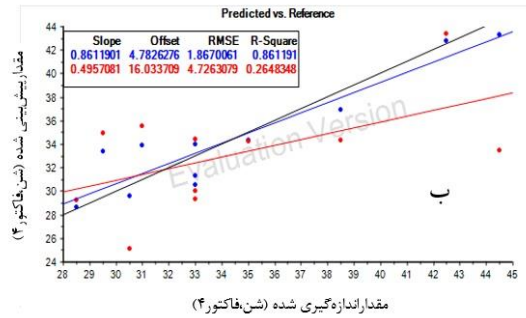
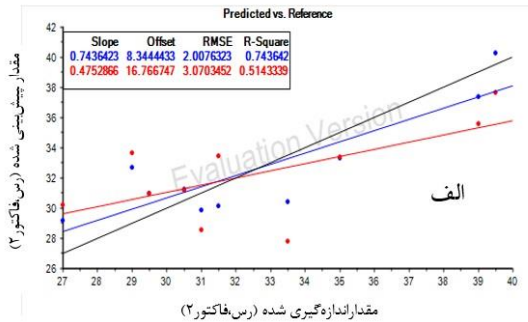
| لوم رسی | | لوم رس شنی | | | رطوبت | روش پیش‌پردازش |
|----------------|-------|----------------|-------|--------|-------|--------------------|
| R ² | | R ² | | | | |
| شن | سیلت | رس | شن | سیلت | رس | |
| ۰/۳۱۰ | ۰/۳۶۸ | ۰/۷۷۹ | ۰/۰۱۶ | ۰/۲۳۱ | ۰/۸۷ | آون خشک |
| ۰/۰۲۹ | ۰/۶۹۸ | ۰/۴۸۵ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۱۲ | ۰/۵۶۹ | ۵ |
| ۰/۷۱۱ | ۰/۸۱۷ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۴۲ | Na | ۰/۱۱۱ | ۱۰ بدون پیش‌پردازش |
| ۰/۹۷۹ | ۰/۵۲۳ | ۰/۵۹۰ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۸۹ | ۰/۵۳ | ۱۵ |
| ۰/۰۲۶ | ۰/۱۵۹ | ۰/۷۴۶ | ۰/۰۷۶ | ۰/۰۰۶ | ۰/۲۲۷ | ۲۰ |
| ۰/۳۱۲ | ۰/۳۷۸ | ۰/۷۹۴ | ۰/۰۱۶ | ۰/۲۴ | ۰/۹۳۴ | آون خشک |
| ۰/۰۳۴ | ۰/۷۰۴ | ۰/۴۹۲ | ۰/۰۹۹ | ۰/۰۱۵ | ۰/۵۷۵ | ۵ |
| ۰/۷۱۵ | ۰/۸۲۹ | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۵۳ | Na | ۰/۱۱۶ | ۱۰ SG |
| ۰/۹۸۷ | ۰/۵۴۸ | ۰/۵۹۶ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۹۶ | ۰/۵۷۴ | ۱۵ |
| ۰/۰۳۱ | ۰/۱۹۴ | ۰/۷۶۵ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۰۷ | ۰/۲۳۸ | ۲۰ |
| ۰/۱۰۹ | ۰/۰۶۷ | ۰/۹۹۵ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۸۹ | ۰/۳۴۱ | آون خشک |
| ۰/۸۴۲ | ۰/۷۲۵ | ۰/۰۲۱ | ۰/۱۱۴ | ۰/۰۶۴ | ۰/۴۹۵ | ۵ |
| ۰/۰۰۳ | ۰/۷۲۷ | ۰/۶۱۴ | ۰/۰۹۴ | Na | ۰/۱۹۳ | ۱۰ ID+SG |
| ۰/۰۰۱ | ۰/۰۵۴ | ۰/۵۶۸ | ۰/۰۷۳ | ۰/۱۰۱ | ۰/۴۷۶ | ۱۵ |
| ۰/۰۰۶ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۹۵ | ۰/۱۹۸ | Na | ۰/۳۶ | ۲۰ |
| ۰/۱۱۲ | ۰/۴۷۳ | ۰/۶۹۸ | ۰/۰۱۷ | ۰/۲۴۸ | ۰/۹۳۴ | آون خشک |
| ۰/۸۳۲ | ۰/۶۵۷ | ۰/۸۵۶ | ۰/۰۲۴ | ۰/۱۳ | ۰/۲۱۶ | ۵ |
| ۰/۱۶۶ | ۰/۶۵۱ | ۰/۴۱۸ | ۰/۰۷ | ۰/۱۰۲ | Na | ۱۰ Normal+SG |
| ۰/۷۳۳ | ۰/۵۲ | ۰/۹۶۶ | ۰/۰۵۶ | Na | ۰/۱۰۱ | ۱۵ |
| ۰/۰۵۸ | ۰/۳۳ | ۰/۸۳۸ | Na | ۰/۰۰۰۷ | Na | ۲۰ |

جدول ۳- ضریب تبیین انواع روش‌های مختلف پیش‌پردازش در مدل PLSR

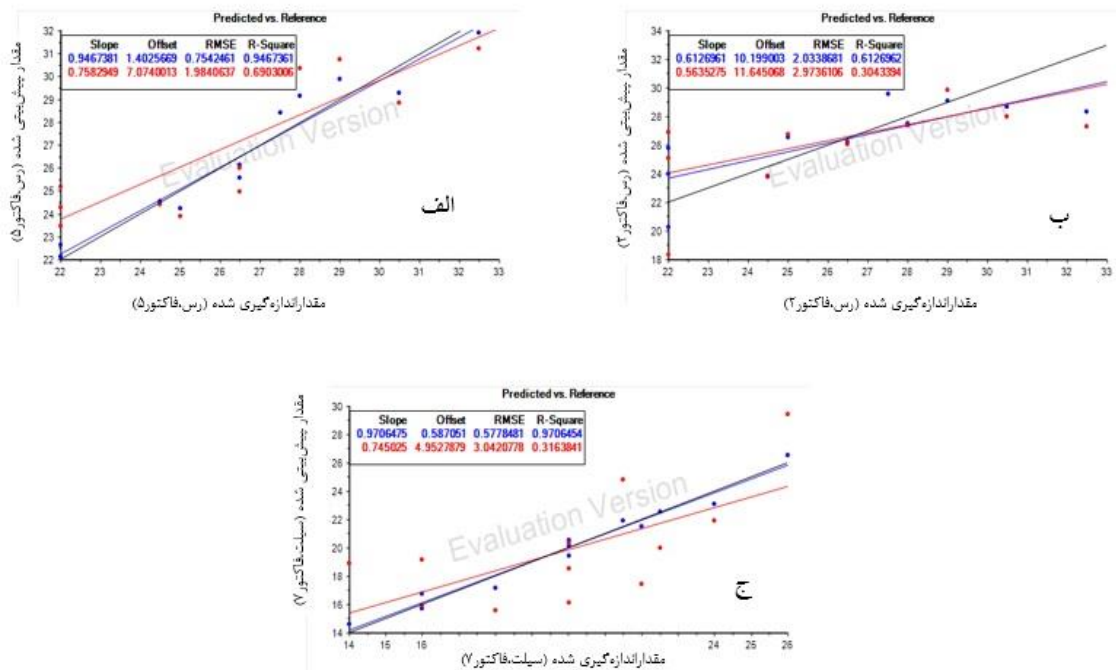
| لوم رسی | | لوم رس شنی | | | رطوبت | روش پیش‌پردازش |
|----------------|-------|----------------|-------|-------|-------|--------------------|
| R ² | | R ² | | | | |
| شن | سیلت | رس | شن | سیلت | رس | |
| ۰/۳۲۵ | ۰/۵۱۶ | ۰/۸۰۷ | ۰/۰۲۱ | ۰/۲۴۷ | ۰/۹۴۱ | آون خشک |
| ۰/۴۲۴ | ۰/۲۹۳ | ۰/۵۷۵ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۳۰ | ۰/۵۹۹ | ۵ |
| ۰/۱۷۳ | ۰/۶۹ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۳۳ | ۰/۱۱۲ | ۱۰ بدون پیش‌پردازش |
| ۰/۴۱۴ | ۰/۲۷۹ | ۰/۴۷۷ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۰۹ | ۰/۵۸۵ | ۱۵ |
| ۰/۰۴۳ | ۰/۲۵۷ | ۰/۵۵۰ | ۰/۱۱۶ | ۰/۹۲ | ۰/۲۳۶ | ۲۰ |
| ۰/۳۲۵ | ۰/۵۱۶ | ۰/۸۰۷ | ۰/۰۲۷ | ۰/۲۵۷ | ۰/۹۴۶ | آون خشک |
| ۰/۶۶ | ۰/۷۳۵ | ۰/۲۷۱ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۳۳ | ۰/۶۱۲ | ۵ |
| ۰/۱۶۹ | ۰/۷۶۲ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۳۳ | ۰/۱۱۸ | ۱۰ SG |
| ۰/۹۹۶ | ۰/۹۹۱ | ۰/۹۸۷ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۰۵ | ۰/۵۹۸ | ۱۵ |
| ۰/۰۴۳ | ۰/۲۷۵ | ۰/۹۷۹ | ۰/۱۱۶ | ۰/۹۷ | ۰/۲۴۷ | ۲۰ |
| ۰/۴۹۹ | ۰/۳۸۸ | ۰/۹۶۱ | ۰/۲۰۳ | ۰/۲۴۴ | ۰/۴۲۶ | آون خشک |
| ۰/۹۲۲ | ۰/۶۹۷ | ۰/۴ | ۰/۱۷۳ | ۰/۱۷۵ | ۰/۵۲۶ | ۵ |
| ۰/۴۴۸ | ۰/۸۹۱ | ۰/۲۹۸ | ۰/۱۵۳ | ۰/۶۳۵ | ۰/۲۴۱ | ۱۰ ID+SG |
| ۰/۴۱۶ | ۰/۳ | ۰/۶۶ | ۰/۱۸۳ | ۰/۲۷۲ | ۰/۵۳ | ۱۵ |
| ۰/۳ | ۰/۲۶ | ۰/۲۳ | ۰/۲۷ | ۰/۶۹ | ۰/۴۱ | ۲۰ |
| ۰/۲۰۲ | ۰/۴۴۱ | ۰/۷۴۳ | ۰/۱۵۳ | ۰/۲۸ | ۰/۹۳۸ | آون خشک |
| ۰/۸۶۱ | ۰/۶۶۷ | ۰/۸۰۹ | ۰/۱۸۷ | ۰/۱۶۳ | ۰/۶۳۲ | ۵ |
| ۰/۷۴۲ | ۰/۶۷ | ۰/۵۶۱ | ۰/۲۰۹ | ۰/۱۲۱ | ۰/۲۶۸ | ۱۰ Normal+SG |
| ۰/۱۸۸ | ۰/۵۷۲ | ۰/۹۸۹ | ۰/۱۱۵ | ۰/۱۲۵ | ۰/۱۴ | ۱۵ |
| ۰/۱۱ | ۰/۳۴ | ۰/۸۸ | ۰/۳۴ | ۰/۱۱ | ۰/۳۱ | ۲۰ |

طیفی نمونه‌های مستقل به بررسی صحت و اعتبار مدل رگرسیونی به‌دست آمده پرداخته شد. مقادیر برآورد شده برای گروه واسنجی و اعتبارسنجی رس بسیار نزدیک به یکدیگر بودند، به این معنی که این جزء با دقت نسبتاً بالایی قابل برآورد است، ولی شن و سیلت با دقت کمتری برآورد شد.

برآورد اجزای بافت خاک: شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده در گروه اعتبارسنجی را نشان می‌دهند. مدل به‌دست آمده در مرحله واسنجی، مورد صحت‌سنجی قرار گرفت تا توانایی مدل برای تخمین مقادیر شن، سیلت و رس نمونه‌های مجهول مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس، با روش تخمین کامل و بر پایه داده‌های



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از PLSR در بافت CL (نقاط آبی مربوط به گروه واسنجی و نقاط قرمز مربوط به گروه اعتبارسنجی) الف) رس، رطوبت آون خشک، ب) شن، رطوبت پنج درصد، ج) سیلت، رطوبت پنج درصد، د) رس، رطوبت پنج درصد، ه) شن، رطوبت ۱۰ درصد، و) رس، رطوبت ۱۵ درصد و ز) رس، رطوبت ۲۰ درصد



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از PLSR در بافت SCL (نقاط آبی مربوط به گروه واسنجی و نقاط قرمز مربوط به گروه اعتبارسنجی) الف) رس، رطوبت پنج درصد، ب) رس، رطوبت پنج درصد و ج) سیلت، رطوبت ۲۰ درصد

به‌خوبی برآورد شد، ولی شن و سیلت فقط در رطوبت-های پنج و ۱۰ درصد برآورد شدند. در بافت لوم رس شنی نیز رس در سه رطوبت آون خشک، پنج و ۱۵ درصد و سیلت در رطوبت ۲۰ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که رس با دقت بیشتری نسبت به شن و سیلت قابل برآورد است. ذرات رس در بیشتر مواقع از کانی‌های رسی تشکیل یافته است. بنابراین، تأثیر کانی‌شناسی بر روی طیف‌ها می‌تواند یک ویژگی ارزشمند برای برآورد محتوی رس باشد.

پژوهشگران مختلف نتایج متفاوتی در ارزیابی مقادیر شن، سیلت و رس خاک گزارش کرده‌اند. Summer و همکاران (۲۰۱۱) طیف VIS-NIR را به‌عنوان شاخصی برای برآورد ویژگی‌های خاک (مقدار رس، غلظت کربنات، مقدار کربن آلی و اکسید آهن) مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج رگرسیون کمینه مربعات جزئی مقدار R^2 بیشتر از ۰/۵ را برای همه تحلیل‌ها نشان داد. Curcio و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد دو روش حذف پیوسته (CR) و رگرسیون کمینه مربعات جزئی (PLSR) را برای برآورد بافت خاک به‌وسیله اندازه‌گیری بازتاب VNIR و SWIR بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که روش

بر مبنای آنچه در جداول ۴ و ۵ ارائه شده، مدل PLSR قادر است، مقادیر رس نمونه‌های مستقل را با R^2 ، RMSE، خطای استاندارد تخمینی (SEP) و نیز همبستگی دوطرفه به‌ترتیب ۰/۷۴، ۲، ۲/۱۲ و ۰/۸۶ در رطوبت آون خشک ۰/۸۱، ۱/۸۷، ۱/۹۶ و ۰/۹۰ در رطوبت پنج درصد، ۰/۹۹، ۱/۵۳، ۱/۶۱ و ۰/۹۳ در رطوبت ۱۵ درصد، ۰/۸۸، ۰/۷۰، ۰/۷۳ و ۰/۹۹ در رطوبت ۲۰ درصد در بافت لوم رسی و ۰/۷۵، ۰/۷۹ و ۰/۹۷ در رطوبت آون خشک، ۰/۶۱، ۲/۰۳ و ۲/۱۲ در رطوبت پنج درصد در بافت لوم رس شنی برآورد کند. سیلت با مقادیر R^2 ، RMSE، خطای استاندارد تخمینی (SEP) و نیز همبستگی دوطرفه به‌ترتیب ۰/۶۷، ۳/۴۴، ۳/۶۱ و ۰/۸۲ در رطوبت پنج درصد در بافت لوم رسی و ۰/۹۷، ۰/۵۸، ۰/۶۰ و ۰/۹۸ در رطوبت ۲۰ درصد در بافت لوم رس شنی برآورد شد. مقدار شن نیز با R^2 ، RMSE، خطای استاندارد تخمینی (SEP) و نیز همبستگی دوطرفه به‌ترتیب ۰/۸۶، ۱/۸۷، ۱/۹۶ و ۰/۹۳ در رطوبت پنج درصد، ۰/۷۴، ۲/۶۳، ۲/۷۶ و ۰/۸۵ در رطوبت ۱۰ درصد در بافت لوم رسی برآورد بهتری داشت. در بافت لوم رسی بخش رس در همه رطوبت‌ها به‌جز رطوبت ۱۰ درصد

انعکاسی ماوراء بنفش-مرئی-مادون قرمز نزدیک را در برآورد همزمان برخی از ویژگی‌های خاک با استفاده از روش PCA مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت این روش برای اندازه‌گیری pH، مقدار رطوبت وزنی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کلسیم و منیزیم تبدیلی خوب بود، در حالی که برآوردها برای هدایت الکتریکی، آهن آزاد، شن، سیلت، سدیم و پتاسیم تبدیلی کمتر بود.

PLSR بهتر از روش CR است. ارزیابی دقت و صحت بافت خاک با استفاده از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) انجام و نشان داد که روش CR اجازه برآورد متوسطی تنها برای جزء رس ارائه می‌دهد. اما استفاده از روش PLSR منجر به سطح دقت بالا برای جز رس (درصد $RMSE=5/8$ ، $R^2=0/87$)، شن (درصد $RMSE=7/7$ ، $R^2=0/80$) و سیلت (درصد $RMSE=7/2$ ، $R^2=0/60$) می‌شود. Islam و همکاران (۲۰۰۳)، توانایی طیفسنجی

جدول ۴- مشخصات آماری اعتبارسنجی مدل تخمین‌گر شن، سیلت و رس بافت لوم رسی

| Correlation | Bais | SEP | RMSE | R^2 | Factor | رطوبت | اجزای بافت | بافت خاک |
|-------------|---------|--------|--------|-------|--------|---------|------------|----------|
| ۰/۸۶۲۳ | ۰/۰۰۰۹ | ۲/۱۱۶۲ | ۲/۰۰۷۶ | ۰/۷۴ | ۲ | آون خشک | | |
| ۰/۸۹۹۷ | ۰/۰۰۰۶ | ۱/۹۵۷۳ | ۱/۸۶۶۲ | ۰/۸۱ | ۲ | ۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۰ | رس | |
| ۰/۹۸۶۵ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۷۳۴۷ | ۰/۷۰۰۵ | ۰/۹۹ | ۶ | ۱۵ | | |
| ۰/۹۳۳۷ | ۰/۰۰۱۲ | ۱/۶۰۵۹ | ۱/۵۳۱۲ | ۰/۸۸ | ۴ | ۲۰ | | |
| - | - | - | - | - | - | آون خشک | | |
| ۰/۸۱۶۸ | ۰/۰۰۰۰ | ۳/۶۰۵۲ | ۳/۴۳۷۵ | ۰/۶۷ | ۱ | ۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۰ | سیلت | لوم رسی |
| - | - | - | - | - | - | ۱۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۲۰ | | |
| - | - | - | - | - | - | آون خشک | | |
| ۰/۹۲۸۰ | -۰/۰۰۱۸ | ۱/۹۵۸۱ | ۱/۸۶۷۰ | ۰/۸۶ | ۴ | ۵ | | |
| ۰/۸۵۱۳ | -۰/۰۰۲۸ | ۲/۷۵۷۹ | ۲/۶۲۹۶ | ۰/۷۴ | ۳ | ۱۰ | شن | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۲۰ | | |

نتیجه‌گیری

۰/۷۴ و ۲ در رطوبت آون خشک ۰/۸۱ و ۱/۸۷ در رطوبت پنج درصد، ۰/۹۹ و ۱/۵۳ در رطوبت ۱۵ درصد، ۰/۸۸ و ۰/۷۰ در رطوبت ۲۰ درصد و در بافت لوم رس شنی با R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۷۵ در رطوبت آون خشک، ۰/۶۱ و ۲/۰۳ در رطوبت پنج درصد با دقت بالایی برآورد شد. سیلت با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۶۷ و ۳/۴۴ در رطوبت پنج درصد در بافت لوم رسی و ۰/۹۷ و ۰/۵۸ در رطوبت ۲۰ درصد در بافت لوم رس شنی با دقتی قابل قبول برآورد شد. در حالی که، جزء شن فقط در بافت لوم رسی با R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۸۶ و ۱/۸۷ در

این پژوهش، بر استفاده از بازتاب‌های مرئی-مادون قرمز نزدیک برای برآورد اجزای بافت خاک و همچنین، ارزیابی چندین روش متفاوت پیش‌پردازش‌های طیفی و تحلیل داده‌ها متمرکز شد. در مقایسه مدل‌های استفاده شده در این پژوهش، مدل PLSR و روش پیش‌پردازش SG به همراه نرمال‌سازی داده‌های طیفی برای بافت لوم رسی و روش SG به تنهایی برای بافت لوم رس شنی برآورد بهتری از خصوصیات مورد اندازه‌گیری نشان داد. جزء رس در بافت لوم رسی با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب

خاک، مانند ماده آلی را می‌توان به‌کار گرفت. با توجه به این‌که طیف بازتابی متأثر از ویژگی‌های متفاوتی از خاک است و با افزایش تعداد داده‌ها مقدار خطا به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند، لذا پیشنهاد می‌شود که این روش بر روی سایر بافت‌ها و با خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مختلف با تعداد داده‌های بیشتر انجام شده و دقت آن مورد بررسی قرارگیرد.

رطوبت پنج درصد، ۰/۷۴ و ۲/۶۳ در رطوبت ۱۰ درصد برآورد بهتری داشت. در نهایت این نتیجه به‌دست آمد که اگرچه روش طیف‌سنجی در برآورد اجزای بافت خاک نسبت به روش‌های آزمایشگاهی دقت کمتری داشته، اما هنوز روش طیف‌سنجی ارزان‌تر بوده، منبع با ارزشی از اطلاعات برای برآورد خصوصیات خاک در مدت زمان کوتاه‌تری در اختیار کاربران قرار می‌دهد. برای افزایش کارایی این روش استفاده از سایر ویژگی‌های تأثیرگذار بر روی رطوبت

جدول ۵- مشخصات آماری اعتبارسنجی مدل تخمین‌گر شن، سیلت و رس بافت لوم رس شنی

| Correlation | Bais | SEP | RMSE | R ² | Factor | رطوبت | اجزای بافت | بافت خاک |
|-------------|---------|--------|--------|----------------|--------|---------|------------|------------|
| ۰/۹۷۳۰ | -۰/۰۰۱۳ | ۰/۷۸۸۱ | ۰/۷۵۴۵ | ۰/۹۵ | ۵ | آون خشک | | |
| ۰/۷۸۲۷ | ۰/۰۰۰۲ | ۲/۱۲۴۳ | ۲/۰۳۳۹ | ۰/۶۱ | ۲ | ۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۰ | رس | |
| - | - | - | - | - | - | ۲۰ | | |
| - | - | - | - | - | - | آون خشک | | |
| - | - | - | - | - | - | ۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۰ | سیلت | لوم رس شنی |
| - | - | - | - | - | - | ۱۵ | | |
| ۰/۹۸۵۱ | -۰/۰۰۴۹ | ۰/۶۰۴۹ | ۰/۵۷۹۲ | ۰۰/۹۷ | ۷ | ۲۰ | | |
| - | - | - | - | - | - | آون خشک | | |
| - | - | - | - | - | - | ۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۰ | شن | |
| - | - | - | - | - | - | ۱۵ | | |
| - | - | - | - | - | - | ۲۰ | | |

منابع مورد استفاده

- Babaeian, E., M. Homae and A.A. Norouzi. 2014. Deriving and validating parametric spectrotransfer functions for estimating soil hydraulic properties in VIS-NIR-SWIR range. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3: 27-40 (in Persian).
- Ben-Dor, E. and A. Banin. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2): 364-372.
- Bowers, S.A. and R.J. Hanks. 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100(2): 130-138.
- Brown, D.J. 2007. Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. *Geoderma*, 140(4): 444-453.
- Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. *Manual of Remote Sensing*, 3: 3-52.
- Curcio, D., G. Ciralo, F. D'Asaro and M. Minacapilli. 2013. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 494-503.
- Debaene, G., J. Niedźwiecki and A. Pecio. 2010. Visible and near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. *Polish Journal of Environmental Studies*, 3: 3-9.

8. Ehsani, M., S. Upadhyaya, W. Fawcett, L. Protsailo and D. Slaughter. 2001. Feasibility of detecting soil nitrate content using a mid-infrared technique. *Transactions of the ASAE*, 44: 1931-1940.
9. Farmer, V.C. and J.D. Russell. 1964. The infrared spectra of layer silicates. *Spectrochimica Acta*, 20: 1149-1173.
10. Fearn, T., C. Riccioli, A. Garrido-Varo and J.E. Guerrero-Ginel. 2009. On the geometry of SNV and MSC. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 96(1): 22-26.
11. 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.
12. Gras, J.P., B.G. Barthès, B. Mahaut and S. Trupin. 2014. Best practices for obtaining and processing field visible and near infrared (VNIR) spectra of topsoil. *Geoderma*, 215: 126-134.
13. Hassink, J., L. Bouwman, K. Zwart and L. Brussaard. 1993. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25: 47-55.
14. Hunt, G.R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in visible and near-infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
15. Islam, K., B. Singh and A. McBratney. 2003. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. *Soil Research*, 41(6): 1101-1114.
16. Janik, L.J., R.H. Merry, S.T. Forrester, D.M. Lanyon and A. Rawson. 2007. Rapid prediction of soil water retention using mid infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2): 507-514.
17. Kuśnierek, K. 2011. Pre-processing of soil visible and near infrared spectra taken in laboratory and field conditions to improve the within-field soil organic carbon multivariate calibration. *The Second Global Workshop on Proximal Soil Sensing, Montreal, Canada*, 100-103 pages.
18. Minasny, B., A.B. McBratney, G. Tranter and B.W. Murphy. 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(5): 960-971.
19. Nawar, S., H. Buddenbaum, J. Hill, J. Kozak and A.M. Mouazen. 2016. Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Soil and Tillage Research*, 155: 510-522.
20. Savitzky, A. and M.J. Golay. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1639.
21. Summers, D., M. Lewis, B. Ostendorf and D. Chittleborough. 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*, 11(1): 123-131.
22. Tranter, G., B. Minasny, A.B. McBratney, R.A. Rossel and B.W. Murphy. 2008. Comparing spectral soil inference systems and mid-infrared spectroscopic predictions of soil moisture retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5): 1394-1400.
23. Viscarra Rossel, R.A. and A.B. McBratney. 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. *Geoderma*, 85: 19-39.
24. Viscarra Rossel, R.A., R.N. McGlynn and A.B. McBratney. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137: 70-82.