دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

کارآیی فن‌آوری مجاورت‌سنجی به‌منظور برآورد مقادیر سیلت در خاک‌های استان مازندران

مجید دانش[۱]، حسینعلی بهرامی[۲] و سید مصطفی عمادی[۳]

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: m.danesh@sanru.ac.ir)
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷
صفحه: ۳۸ تا ۵۱

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف: سیلت از مهمترین اجزای بافت بوده که بطور مستقیم در فرآیند فرسایش خاک دخیل است و در بسیار از پروژه‌های مدیریت فرسایش و حفاظت خاک، باید مدنظر قرار گیرد. مطالعهٔ این جزء خاک، با استفاده از روش‌های سنتی و مرسوم آزمایشگاهی، در مقیاس وسیع، مستلزم صرف وقت، هزینه و انرژی بالایی می‌باشد. امرزوه، با استفاده از روش‌های نوین همچون فن‌آوری طیف‌سنجی، می‌توان با سرعت بیشتر و صرف هزینه و وقت کمتر، به بررسی اجزای خاک پرداخت. پژوهش حاضر قصد دارد به مطالعهٔ رفتارهای طیفی اجزای سیلت خاک در استان مازندران با استفاده از فن‌آوری طیف‌سنجی بازتابی، بپردازد.

مواد و روش‌ها: بدین ترتیب، مجموع ۱۲۸ نمونهٔ خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک، بر اساس روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شدهٔ تصادفی (SRS) و نیز با کمک اطلاعات جانبی همچون: زمین‌شناسی، کاربری‌اراضی، نقشهٔ راه‌ها، و خاک‌شناسی استان، جمع‌آوری شد. در ابتدا، مجموع نمونه‌ها به دو قسمت: برای ایجاد مدل (واسنجی) و برای صحت‌سنجی مستقل (اعتبارسنجی)، تقسیم شدند. با بهره‌گیری از تحلیل چندمتغیرهٔ رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و بر اساس تکنیک اعتبارسنجی متقاطع (CV)، و عملیات پیش‌پردازش ابرطیفی همچون: میانگین‌گیری (کاهش- داده‌های- طیفی)، الگوریتم‌های هموارسازی و مشتق اول طیفی (1st D) بر اساس الگوریتم ساویتسکی-گولای (SGA)؛ علائم طیفی و دامنه‌های بازتابی مختص اجزای سیلت، مشخص گردید.

یافته‌ها: بررسی علائم و رفتارهای طیفی ذرات سیلت، بر اساس عملیات مدل‌سازی بر مبنای الگوریتم PLS به انجام رسید. مدل نهایی با تعداد ۴ فاکتور پنهان (LFs) با این مشخصات کالیبره شد، RC: ۰/۵۵، RMSEC: ۸/۳۱ ٪، RPDC تقریبی ۱/۲۰، و نیز RPIQC تقریبی ۱/۷۱، که به‌عنوان مطلوب‌ترین مدل جهت برآورد مقادیر سیلت خاک‌های استان مازندران، شناخته شد. نتایج، نشان دهندهٔ توانایی مدل در تخمین مقادیر سیلت منطقه بوده است که در ادامه، دامنه‌های طیفی مؤثر در بررسی اجزای سیلت، نیز آشکارسازی شده و مشخص گردید. ضرایب همبستگی مقادیر سیلت با دامنه‌های طیفی مؤثر نیز بدین ترتیب محاسبه شدند: UV ۳۹۰ نانومتر: ۰/۲۷، Vis ۶۸۰ نانومتر: ۰/۳۱، NIR ۹۷۰ الی ۹۹۰ نانومتر: ۰/۳۲، SWIR: باندهای ۱۴۰۰ الی ۱۴۱۰ نانومتر: ۰/۳۴، ۱۹۱۰ الی ۱۹۳۰ نانومتر: ۰/۳۸، ۲۲۰۰ الی ۲۲۱۰ نانومتر: ۰/۳۹، ۲۳۴۰ الی ۲۳۵۰ نانومتر: ۰/۴۱ و نیز در آخر، برای باندهای ۲۴۳۰ الی ۲۴۶۰ نانومتر: ۰/۴۳ محاسبه گردید. باندهای طیفی تعیین شده با بیشترین مقادیر همبستگی (R(CCmax))، حاکی از نفوذ و تأثیر بالای آن‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل تخمین‌گر، در فرآیند مدلینگ پارامتر سیلت در استان مازندران، بوده‌اند. در نهایت، قابلیت فن‌آوری مجاورت‌سنجی بازتابی پراکنشی مرئی-مادون قرمز نزدیک (VNIR-PS)، در بررسی اجزای سیلت در منطقه به اثبات رسید.

نتیجه‌گیری: در این شیوه، علاوه بر فرآیند مدل‌سازی، دامنه‌ها و باندهای طیفی بارز تحت اثر سیلت مشخص گردید که می‌تواند به‌عنوان مبنایی جهت بررسی مقادیر سیلت در مقیاس بسیار وسیع، با عملیات بیش‌مقیاس‌سازی توسط داده‌های ابرطیفی هوایی- ماهواره‌ای، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، این امر نشان دهندهٔ اهمیت فن‌آوری طیف‌سنجی بازتابش خاک، به‌عنوان پایه‌ای در آشکارسازی و تشخیص طول‌موج‌های طیفی مفید و نیز ایجاد مدل، جهت استفادهٔ آن در داده‌های دورسنجی ماهواره‌ای می‌باشد. همچنین، توصیه می‌شود برای بهبود کیفیت مدل، از داده‌هایی با ضریب تغییرات بالاتر و نیز رنج بیشتر استفاده گردد تا الگوریتم pls بتواند به‌طور بهتری عمل کند.

واژه‌های کلیدی: بیش‌مقیاس‌سازی، پهنه‌بندی رقومی، سیلت، مجاورت‌سنجی بازتابی، PLSR

مقدمه

ترکیب ذرات خاک (SPC)، نقش‌های بسیار بارزی در حاصل‌خیزی خاک، فرسایش، حفاظت محیط زیست و توسعهٔ کشاورزی پایدار ایفا می‌کند (۲۳). در مناطق با شرایط بحرانی فرسایش خاک، اطلاع از اجزای بافت، بطور مستقیم منعکس کنندهٔ وضعیت حفاظت خاک در منطقه است (۱۹،۲۱). آگاهی از اجزای سیلت خاک، در بسیاری از مباحث زیست‌محیطی همچون فرسایش‌پذیری خاک و بیابان‌زایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بطوری‌که در تحقیقات نشان داده شده، خاک‌هایی با مقادیر بالای سیلت، دارای خاک‌واحدهایی با استحکام و پایداری بسیار کم، فرسایش‌پذیری بسیار بالا و با خطر تولید روانآب و ایجاد پوسته‌های سطحی همراه می‌باشند (۹،۱۹،۲۱،۲۳). لذا، پهنه‌بندی اجزای سیلت خاک، در مقیاس‌های مختلف، در بسیاری از تحقیقات پایه‌ای مورد نیاز است. روش‌های آزمایشگاهی سنتی، وقت‌گیر، پر زحمت و پر هزینه بخصوص برای مناطق وسیع، می‌باشند. بنابراین، یک روش سریع، آسان و با دقت مناسب برای محاسبهٔ خصوصیات خاک، لازم و ضروری است (۱۰،۱۷). در این راستا؛ روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک و میانی، یک فن‌آوری امیدبخش بوده که با اسکن کردن نمونه‌های خاک بطور سریع، ارزان و غیرتخریبی، قادر به ایجاد انقلابی نوین در تشخیص و پایش پارامترهای خاک، می‌باشد (۱۶،۲۰،۲۱،۲۳). روش مجاورت‌سنجی خاک (PSS)، غیرتخریبی، سریع، قابل تکرار و کم هزینه می‌باشد و می‌تواند بعنوان مکمل و یا جایگزین روش‌های سنتی مطالعهٔ پارامترهای خاک گردد (۱۷،۲۱). اجزای تشکیل دهندهٔ خاک، سبب ایجاد انواع طیف‌های خاک به‌همراه منحنی‌های مشخصهٔ مربوطه (Spectral Characteristic Curves)، می‌گردد. بنابراین، از خصوصیات طیفی (SSCC/SSRC)، برای تخمین و بررسی خصوصیات مختلف خاک استفاده می‌شود (۱۱،۲۱،۳۰،۳۱،۳۳). نوآوری فن‌آوری مجاورت‌سنجی طیفی که به‌عنوان "روش سبز بررسی خاک" نیز شناخته می‌شود، در پی بردن به

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

رفتارهای طیفی خاک، تشخیص پدیده‌های طیفی جذبی و بارز مربوط به پارامترهای مؤثر خاک (SAFs/DAFs) و نیز قابلیت اسکن سریع، کم هزینه و به دور از تخریب محیط زیست است که به عنوان متدی نوین، در علوم خاک محسوب می‌گردد. همچنین این فن‌آوری بعنوان پایه و مبنای تحقیقات دورسنجی پارامترهای خاک در عملیات آپ–اسکیلینگ می‌باشد. از دیدگاه خصوصیات و علائم طیفی خاک[1] در محدودهٔ بازتابی Vis-NIR[2]، منحنی بازتاب طیفی خاک[3] (SSRC) در محدودهٔ طیفی ۴۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، دارای شکل مقعر بوده و تحت تأثیر پارامترهای مختلفی همچون رطوبت، بافت و توزیع اندازهٔ ذرات[4] (PSD)، ساختمان، مادهٔ آلی و آهک خاک، ترکیبات معدنی همچون مقدار آهن و نوع کانی‌های رسی، می‌باشد (۱،۲،۸،۱۳،۲۱،۲۳). اجزای بافت خاک به دلایل مینرالوژیکی و نیز تأثیر بر اندازهٔ ذرات و زبری سطح، بطور مستقیم بر خصوصیات طیفی خاک[5] (SOP) اثرگذار می‌باشند (۸،۲۱،۳۳). به طوری‌که، نور (طیف ورودی)، در بین ذرات درشت‌تر اجزای خاک‌واحدها گیر افتاده[6] و سبب ایجاد علائمی بر طیف‌های بازتابی می‌گردد (۸،۱۳). اندازهٔ خاک دانه‌ها و شکل آن‌ها نیز بر رفتارهای طیفی خاک اثرگذار است. بطوری‌که با بزرگ‌تر شدن قطر ذرات خاک، سبب کاهش مقدار و شدت بازتاب طیفی می‌شود. از طرفی، شکل خاک‌دانه‌ها به اجزای بافت و ساختمان خاک بستگی دارد. لذا؛ سطح صاف و هموار که از خاک‌واحدهای کروی بیشتری تشکیل شده، نسبت به خاک‌های ناهموار دارای بازتاب بیشتری می‌باشد (۸،۱۳). بر اساس تحقیقات انجام شده توسط ماتنی و همکاران (۱۵) و اوگن و همکاران (۱۸)، مشخص شد، تحقیقات آزمایشگاهی مجاورت‌سنجی مرئی–مادون قرمز نزدیک (VNIRS)، برای تخمین و بررسی گسترهٔ وسیعی از اجزای خاک، بسیار مفید و مناسب واقع شده است (۱۵،۱۸). به‌طوری‌که سامرز و همکاران (۲۸) و همچنین استنبرگ و همکاران (۲۹)، توانستند با فن‌آوری مجاورت‌سنجی VNIR-PS[7] به بررسی اجزای بافت خاک با دقت مناسبی دست یابند. پیترزیکوسکی و چداک (۲۲) با بکارگیری شیوهٔ VNIRS نشان دادند، اختلاف اصلی بین پدیده‌ها و رفتارهای طیفی خاک‌های مورد مطالعه، بدلیل تفاوت در اجزای بافت، اندازهٔ ذرات و نیز منشأ زمین‌شناسی مواد مادری آن‌ها بوده است (۲۲). دانش و همکاران (۸)، با بهره‌گیری از فن‌آوری طیف‌سنجی آزمایشگاهی به تخمین مقادیر رس بافتی با دقت بسیار مناسب، مبادرت ورزیدند. همچنین، کورسیو و همکاران (۷)، با بهره‌گیری از تکنیک شیمیایی‌سنجی رگرسیون حداقل مربعات جزئی و نیز با استفاده از تکنیک CRT[8] (پدیده‌های جذبی طیفی ویژه)، به تخمین اجزای سیلت با سطح دقت متوسط، ضریب تبیین (R^2) ۰/۶۰ و نیز خطای مربعات میانگین (RMSE) ۷/۲ ٪ دست یافتند. بعلاوه ایشان، به تعیین و آشکارسازی طول‌موج‌های کلیدی[9] تخمین‌گر اجزای بافت (سیلت)، از دامنهٔ طیف بازتاب شده پرداختند که از این طول‌موج‌های کلیدی بافت خاک، می‌توان در بحث بیش مقیاس‌سازی و سکوهای فضایی و هوایی بهره برد (۷،۱۸). طی بررسی انجام شده توسط اسمال و همکاران (۲۶) مشخص شد، برخی روابط بارز خطی بین جزء سیلت و پدیده‌های جذبی در دامنهٔ مرئی طیف بازتابی، وجود دارد. به طوری‌که راولینز و همکاران (۲۴) به مطالعه و تخمین اجزای بافت با فن‌آوری مجاورت‌سنجی بازتابی VNIR-PS برای خاک‌های با انواع متفاوت مواد مادری پرداختند. البته، ایشان توانستند بر اساس تکنیک شیمیایی‌سنجی رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)، اجزای سیلت را با دقت کم الی متوسط، برآورد کنند. بعلاوه، گومز و همکاران (۹) با تکنیک طیف‌سنجی بازتابی مرئی– مادون قرمز نزدیک و میانی (VNIRS) و تحلیل رگرسیون چندگانهٔ خطی[10] (MLR)، به تخمین برخی پارامترهای خاک همچون اجزای بافت خاک پرداختند، که در آن، اجزای سیلتی بافت، با دقت کمتری قادر به برآورد بودند. زنگ و همکاران (۳۲)، با بهره‌گیری از روش مجاورت‌سنجی و تحلیل طیفی توانستند مقادیر سیلت منطقه را با ضریب تبیین ۰/۷۸ و خطای ۱۰/۲۰ درصد و دقت خوب، برآورد کنند. همچنین، ژو و همکاران (۳۰،۳۱)، با استفاده از روش تحلیل ابرطیفی و مدلینگ پیش‌رفته بر مبنای روش انتخاب باندی (SR)، مقادیر سیلت را با دقت نسبتاً قبل قبول، با ضریب رگرسیون حدود ۰/۵۶ و RPD تقریبی ۱/۴، مورد تخمین و مطالعه قرار دهند. بر مبنای مطالب فوق؛ هدف از تحقیق حاضر، مطالعهٔ اجزای سیلتی خاک با استفاده از تحلیل رفتارها و علائم طیفی این اجزاء، بعنوان فاکتور بارز طیفی و نیز ارزیابی پتانسیل طیف‌سنجی بازتابی در دامنهٔ بازتابی مرئی– مادون‌قرمز نزدیک و موج‌کوتاه (۲۵۰۰–۳۵۰نانومتر) (VNIR/SWIR-PS)، در آشکارسازی پارامتر سیلت با بهره گیری از روش‌های آنالیز پیشرفتهٔ طیفی–آماری، در استان مازندران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

عملیات نمونه‌برداری

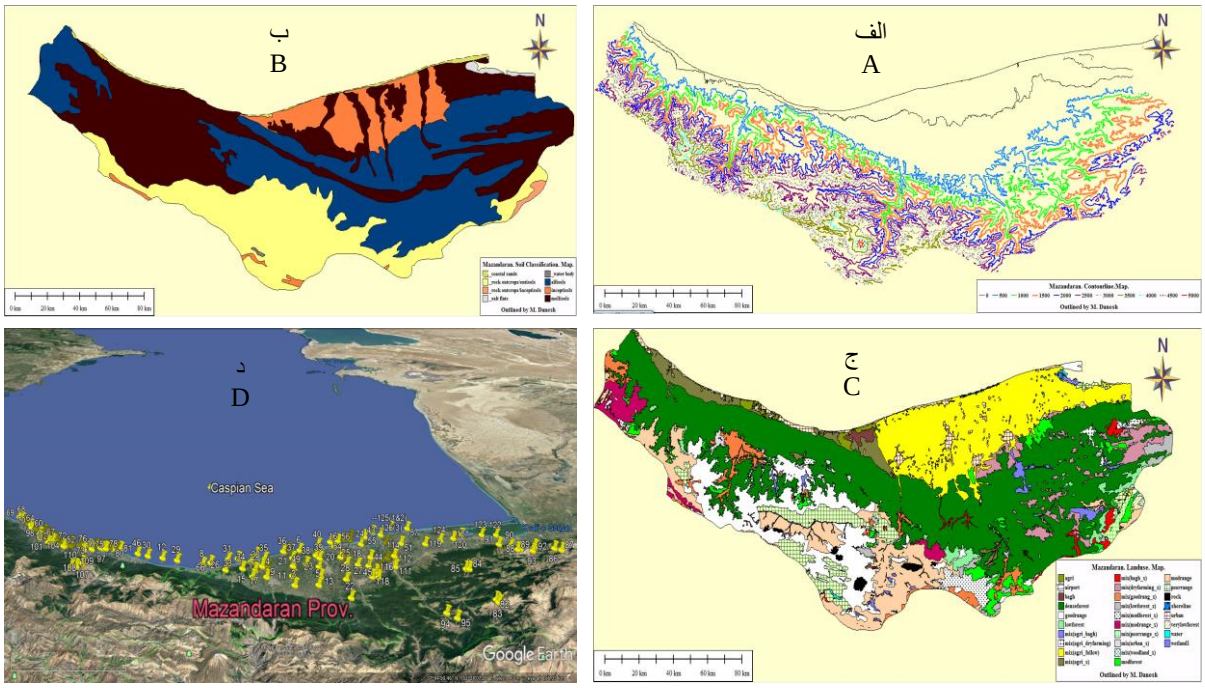
برای داشتن دامنهٔ متفاوت از انواع خاک‌ها با تغییرپذیری مناسب پارامتر سیلت، که عمدتاً در مقیاس منطقه‌ای ایجاد می‌شوند (تنوع و گوناگونی در خصوصیات خاک)، به نمونه‌برداری از خاک نواحی مختلف استان مازندران پرداخته شد. بنابراین، قبل از بررسی‌ها و انجام تحلیل‌های مجاورت‌سنجی[11]، برای دست‌یابی به تغییرپذیری مناسب پارامتر سیلت (برای قوی‌تر شدن برآوردها)، از خاک‌های جغرافیایی مختلف[12]، نمونه‌برداری شد (۲۹). بر این اساس، با اضافه کردن لایه‌های مختلف زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و نقشهٔ راه‌ها، و روش طبقه‌بندی شدهٔ تصادفی[13]، تعداد ۱۲۸ نمونه از ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک بخش‌های مختلف استان، جمع‌آوری و موقعیت مکانی آن‌ها توسط جی‌پی‌اس دستی (Garmin Montana650)، با دقت تقریبی۴ متر، ثبت شد (شکل ۱). در آزمایشگاه خاک‌شناسی، پس از عملیات خرد کردن کلوخه، هوا خشک‌سازی و رد شدن از الک۲ میلیمتری؛ هر نمونه به دو قسمت تقسیم شد: قسمت اول برای تعیین نسبت اجزای سیلتی بافت، با استفاده از روش هیدرومتر تخصیص داده شد (۴) و قسمت دوم نیز، به آزمایشگاه طیف‌سنجی (اتاق تاریک)، برای تحلیل و سنجش‌های طیفی منتقل شدند.

1- Soil spectral signatures and characteristics 2-Visible-Near Infrared 3- Soil Spectral Reflectance Curve
4- Particle Size Distribution 5- Soil Optical Properties 6-Trapped light 7-Visible-NIR Proximal Sensing
8- Continuum Removal tech. 9- Key-wavelengths establishment 10- Multiple Linear Regression method
11- Prior to spectral analysis operations 12- Geographically disparate areas 13-Stratified randomized sampling method

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

چیدمان آزمایشگاه مجاورت‌سنجی بازتابی

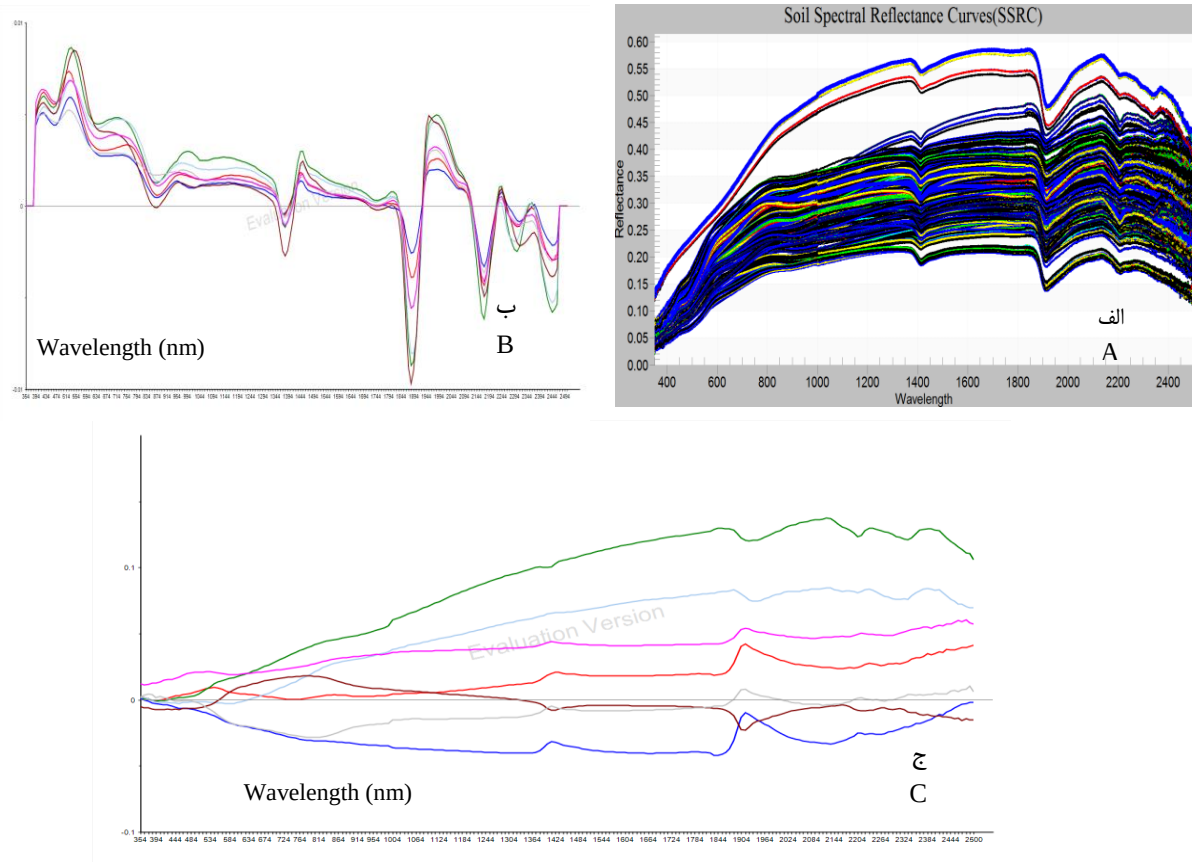
طیف‌ها با استفاده از یک دستگاه تحلیل طیفی اسپکتروراديومتر (ASD) واقع در اتاق تاریک، سنجیده شدند. علائم تابشی از طریق فیبرهای نوری با میدان دید اسمی مخروطی، ۲۵ درجه، جمع‌آوری شدند. برای هر طیف خروجی، ۲۵ طیف منفرد با فواصل ۱ ثانیه‌ای، میانگین‌گیری شدند (شکل ۲). طیف‌های تابشی (رادیانس) با استفاده از پنل مرجع سفید اسپکترالون[1] برای تولید طیف‌های بازتابی نسبی، مورد نرمال‌سازی قرار گرفتند. برای تمامی سنجش‌ها، از یک چیدمان آزمایشگاهی معمول و مشابه استفاده گردید؛ که بر اساس فاصلهٔ هدف– سنجنده حدود ۱۰ سانتیمتر، که متناظر با مساحت حدود ۵ سانتیمتر مربع بر روی نمونه بوده، انجام گردید. از تراز حبابی متصل شده به پایهٔ فیبر نوری، برای قرارگیری در وضعیت عمودی و تطبیق آن با مرکز زاویهٔ دید لحظه‌ای زمینی (GIFOV) استفاده شد. تابش با استفاده از یک لامپ حبابی پنجاه وات هالوژن با منبع تغذیهٔ مجزا ایجاد شد. شیوهٔ تحلیل آماری– طیفی (Spectrostatistical analysis approach) از بین مدل‌های مختلف ریاضی که برای تخمین و مطالعهٔ خصوصیات مختلف خاک با استفاده از تکنولوژی طیف‌سنجی خاک (PSS)، بکار رفته‌اند، شیوهٔ PLSR، رایج‌ترین شیوهٔ آماری چند متغیره با هدف واسنجی (فرآیند مدل‌سازی) متغیرهای بازتاب خاک می‌باشد، که در هنگام مواجهه با مشکلات چند همخطی‌گری در ابعاد بالا[2]، دارای پایداری و دقت تخمین بالاتری نسبت به شیوه‌های سنتی می‌باشد (۱۱،۱۸). البته وجود اختلاف و تنوع در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، منجر به بروز ویژگی‌های متنوع طیفی[3] می‌گردد (۱۱،۳۱). بنابراین، تحلیل آماری–طیفی بر مبنای شیوهٔ رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)[4] به انجام رسید (۱۱،۲۱،۲۹،۳۲،۳۳). عملیات پیش پردازش طیفی برای کاهش آثار تداخلات ناشی از تجهیزات نوری شامل: نمونه‌برداری مجدد ابرطیفی، هموارسازی نویزهای تصادفی با فیلتر هموارساز ساویتسکی گولای (SG) مرتبهٔ ۲ بهمراه ۳ نقطهٔ هموارساز و نیز هستهٔ تقارنی[5]، تحلیل مشتق اول و نیز عملیات مرکزگیری طیفی، انجام شد (شکل ۲). همچنین، از فرآیند اعتبارسنجی متقاطع (Cross Validation Technique) برای کل نمونه‌ها، جهت تعیین پیش‌پردازش مطلوب، استفاده گردید (۶،۸).



شکل ۱– لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در عملیات نمونه‌برداری: الف) خطوط هم‌ارتفاع، ب) خاک‌شناسی، ج)کاربری اراضی، د)موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در بخش‌هایی از استان مازندران
(GCS: Lat-Long WGS 1984: 36° 38´ 06´´to 36° 54´ 59´´ N; 50° 31´ 21´´to 53° 56´ 52´´ E)
Figure 1. Information used for sampling; vector layers: A) contourline, B) pedology, C) landuse and D) geolocation of sampled points throughout the Mazandaran Province with defined GCS

1- Spectralon standard white reference panel
2- High-dimensional multi-collinearity
3- Different spectral characteristics
4- Partial Least Squares Regression method
5- Symmetric kernel

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]



شکل۲- الف) منحنی‌های بازتابش طیفی (SSRC) نمونه‌های خاک استان مازندران؛ ب) چند طیف نمونه تحت عملیات مشتق اول SG؛ ج) عملیات مرکزگیری طیفی

Figure 2. A) The SSRC of soil samples of Mazandaran province; B) 1st-D SG filter on some spectra; C) Spectral mean centering operation

نتایج و بحث

تحلیل آماری نمونه‌ها

بر اساس آنالیز واریانس مقادیر سیلت در نمونه‌ها (جدول۱)، این پارامتر دارای ضریب تغییرات ۲۳/۸ درصد بوده و با دامنهٔ ۴۹ درصد، از تغییرات کمی برخوردار بوده است. همچنین مقادیر کمینه و بیشینهٔ آن بترتیب، ۱۶٪ و ۶۵٪ بوده است. بر اساس آزمون نرمال کولموگروف-اسمیرنوف و نیز تست Q-Q plot و Box-plot مشخص شد که توزیع مقادیر سیلت، نرمال بوده و فاقد دادهٔ پرت می‌باشد. همچنین بر اساس خصوصیات آماری توزیع[1] پارامتر سیلت، دارای کشیدگی و کمی چولگی بوده و نیز دارای حالت مد-چندگانه[2] بوده است (جدول ۱).

جدول ۱- توصیف آماری نمونه‌ها بر اساس تحلیل واریانس مقادیر سیلت

Table 1. Statistical description of samples based on the ANOVA of silt contents

متغیر Variable	کمینه Min	بیشینه Max	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	میانگین Average	میانه Mean	مد Mode	انحراف‌معیار SD	دامنه Range	ضریب تغییرات٪ CV
سیلت	16	65	-0.248	-0.249	41.62	43	41*	9.89	49	23.8

* حالت مد چندگانه (multi-modal)، که کمترین مقدار آن ذکر شده است.

*Multi-modal statistic with the minimum value

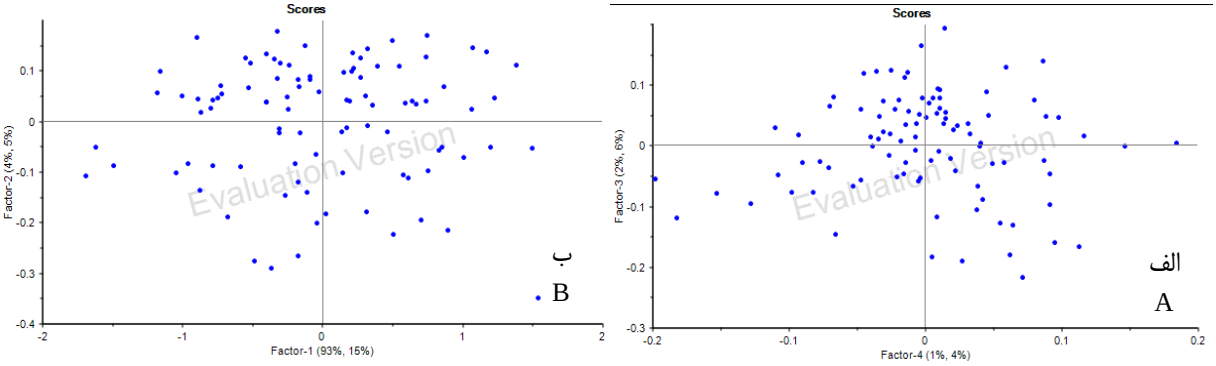
عملیات واسنجی مدل تخمین‌گر سیلت

تا کنون، روش‌های مختلف کمومتریک[3] برای تجزیه و تحلیل داده‌های طیفی خاک، با هدف استخراج دقیق‌تر اطلاعات و مدل‌سازی قوی‌تر، به‌کار رفته است که از بین آن‌ها الگوریتم PLS در علوم خاک، دارای کاربرد بیشتری می‌باشد (۱۲،۲۵،۳۳). این روش، قادر است بر خطاها و مشکلات ناشی از داده‌های دارای چند همخطی[4] و نیز داده‌هایی که در آن تعداد متغیرهای مستقل بیش از تعداد پارامترهای خاک است، فائق آمده و آن‌ها را بخوبی پردازش و مدل کند (۱۲،۲۵،۲۷). با این توضیح، قبل از آغاز مراحل واسنجی و ایجاد مدل مطلوب، نمونه‌ها بطور تصادفی به دوقسمت تقسیم شدند: بدین ترتیب، ۷۵٪ نمونه‌ها برای ایجاد مدل (عملیات واسنجی) و ۲۵٪ آنها برای عملیات اعتبارسنجی، مورد استفاده قرار گرفتند. برای اطمینان از توزیع مناسب نمونه‌ها و نیز مشابه بودن این دو گروه، از آزمون‌های نرمال کولموگروف-اسمیرنوف، استیودنت تی- تست و لون- تست استفاده شد (۱۲)، که نتایج آن‌ها حاکی از شباهت کامل دوگروه در سطح معنی‌داری ۱٪ بوده است. برای دست‌یابی به

1- Statistical distribution properties 2-Multi-modal 3- Chemometrics 4-Highly collinear datasets

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

شاخص فاکتور مطلوب (OIF) مدل و نیز پرهیز از خطای بیش-تخمین[1]، از روش اعتبارسنجی متقاطع با متد حذف تکی کامل[2] (FLOOCVt) استفاده شد. بر اساس آنالیز متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل (شکل۳-الف،ب،پ،ت،ث،ج،چ،ح)، و نیز مقادیر حداقل RMSEcv و مقادیر حداکثر R^2cv (شکل۳- ث،ج،ز،ژ،ط)، مشخص شد که برای بررسی مقادیر سیلت در خاک‌های استان مازندران، مطلوب‌ترین تعداد فاکتور (OIF)، بر اساس ۴ فاکتور پنهان اول می‌باشد (LV=4) که بیشترین واریانس توصیفی (متغیرهای مستقل و وابسته) را در خود گنجانده است (شکل۳-الف،ب،پ،ت،ث،ج،چ،ح). در حین فرآیند واسنجی، انتخاب تعداد مناسب متغیرهای پنهان (LV) و نیز حذف نمونه‌های پرت برای رسیدن به نتایج قابل قبول در زیرمجموعهٔ اعتبارسنجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲۵). در تحقیق حاضر، طی مرحلهٔ واسنجی مدل، داده‌های پرت در ماتریس‌های X و Y تشخیص داده شد. در ماتریس X، داده‌های پرت بر اساس تحلیل حضور مقادیر بالای لوریج (Hotelling T^2 statistics) و باقیمانده‌ها در داده‌های طیفی (Q-Statistics) مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر دو مورد، نمونه‌هایی با مقادیر بالا در سطح معنی‌داری ۵٪، بعنوان دادهٔ پرت تلقی می‌شوند (۱۴،۲۵). بدین ترتیب، بر اساس واریانس مقادیر باقیماندهٔ مستقل و وابسته و نیز واریانس توصیفی متغیرهای طیفی و سیلت؛ (شکل۳-الف،ب،پ،ت،ث،ج،چ،ط، ظ،ع،غ)، بخش اعظم تغییرات طیفی و نیز تغییرات پارامتر سیلت مورد بررسی، توسط چهار مؤلفه (PC=4)، قابل بررسی و مطالعه می‌باشند. به‌گونه‌ای که در شکل۳-الف،ب،پ،ت، مشاهده می‌شود، ۴ مؤلفهٔ پنهان نخست، قادر به تمرکز بیش از ۳۰٪ واریانس مقادیر وابسته (سیلت) و ۹۵٪ واریانس تباین طیفی شده‌اند، که همین عامل مانع از خطای بیش‌برازش مدل خواهد شد و از خطای چند هم‌خطی‌گری و خودهمبستگی[3] بین متغیرهای طیفی، نیز جلوگیری خواهد کرد (۸). همچنین بر اساس آزمون هتلینگ[4]، که بر اساس لوریج تعدیل‌شده[5]، استوار است (شکل۳-ح،خ،د،ذ،ر،ف،ق)، و نیز آزمون تأثیر (IFt) (شکل۳-ح،خ،د،ذ،ر،ف،ق)، مشخص شد که قسمت عمدهٔ نمونه‌های این مجموعه، دارای تأثیر متوسطی در فرآیند تخمین مقادیر سیلت و عملیات مدلینگ بوده‌اند که این امر حاکی از توزیع متوسط نمونه‌ها دارد. بر اساس آزمون تأثیرپذیری (IFt) و نیز مقادیر باقیماندهٔ واریانس حاصل از تست لوریج و آزمون هتلینگ، معلوم شد غالب مقادیر باقیمانده کمتر از حد لوریج و آمارهٔ هتلینگ بوده است که حاکی از عدم حضور داده‌های نامتجانس در عملیات مدل‌سازی بوده است (شکل۳- ح،خ،د،ذ،ر،ع،غ،ف،ق).

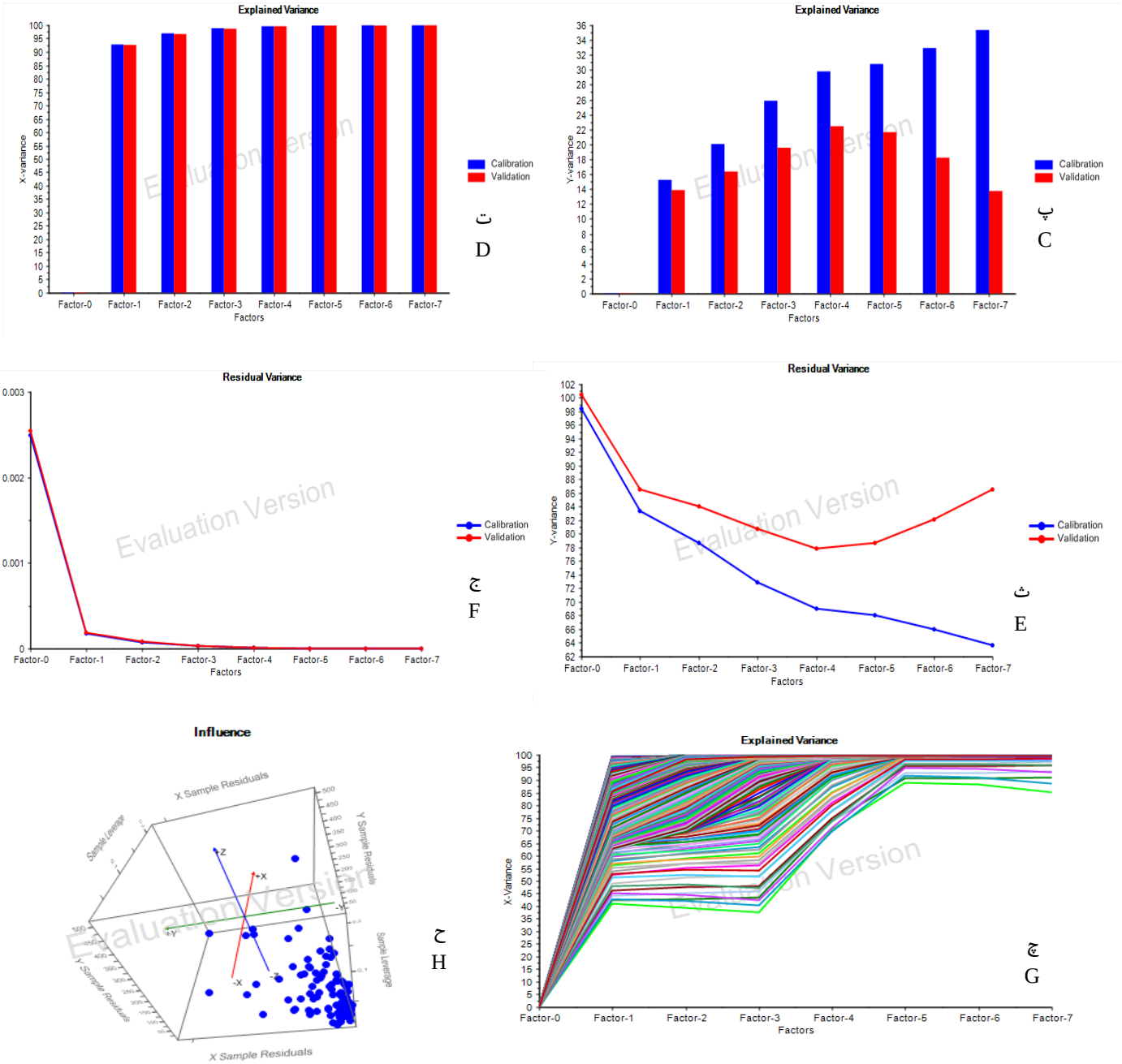


شکل۳- خروجی مدل: عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLSR: الف/ب)تراکم (لحظه‌ای) واریانس طیفی و مقادیر سیلت در فاکتور اول و دوم/ سوم و چهارم

Figure 3. Model output: principal components analyses of PLSR, A) Density of spectral and silt variances based on PC1&2, B) Density of spectral and silt variances based on PC3&4

1- Overprediction error
2Full-Leave-One-Out Cross validation technique
3- Autocorrelation/multi-collinearity errors
4- Hotelling T^2 stat
5- Adjusted leverage

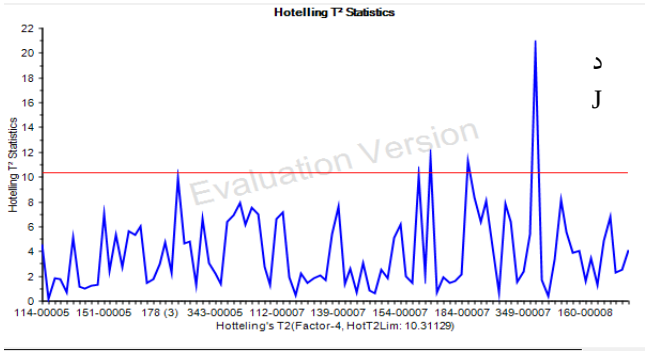
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]



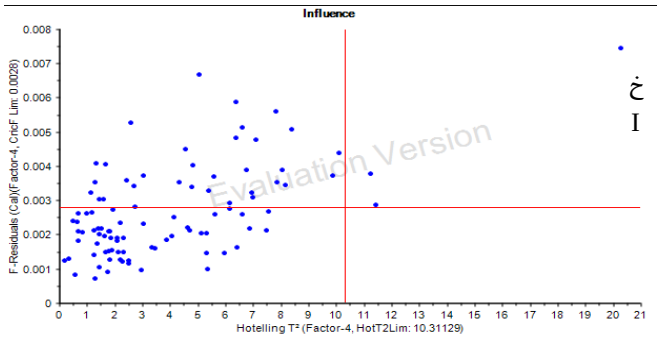
ادامه شکل ۳ – خروجی مدل: عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLSR: پ/ت) واریانس توصیفی تجمعی مقادیر سیلت/ مقادیر طیفی بر اساس ۷مؤلفهٔ منتخب؛ ث/ج) واریانس مقادیر باقیمانده در متغیر وابسته (سیلت)/ متغیرهای مستقل (باندهای بازتابی) بر اساس فاکتورهای منتخب؛ چ) واریانس توصیفی طیفی کل (به تفکیک تعداد متغیرهای مستقل)؛ ح) نمودار تأثیر(نفوذ) بر اساس رابطهٔ بین واریانس متغیرهای وابسته، مستقل و مقادیر لوریج تعدیل شدهٔ نمونه‌ها

Continued Figure 3. Model output: principal components analyses of PLSR, C) Cumulative descriptive variance of silt on LV=7, D) Averaged descriptive variance of spectra on LV=7, E) Residual variance of silt on selective factors, F) Residual variance of reflectance spectra on selective factors, G) Total explained variance (by number of independent variables), H) Influence diagram by relationships between variances of dependent variable, independent variable and adjusted leverage

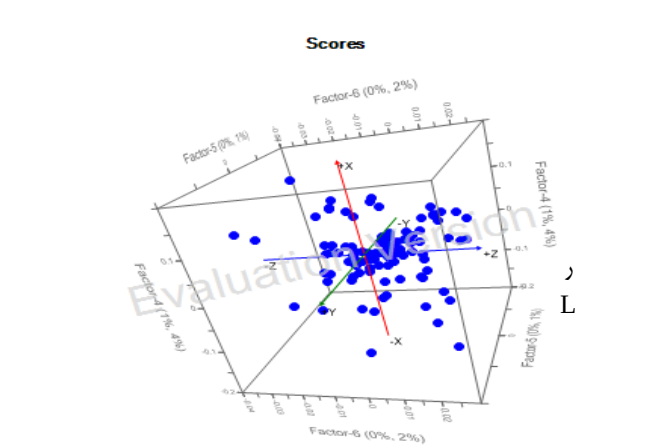
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]



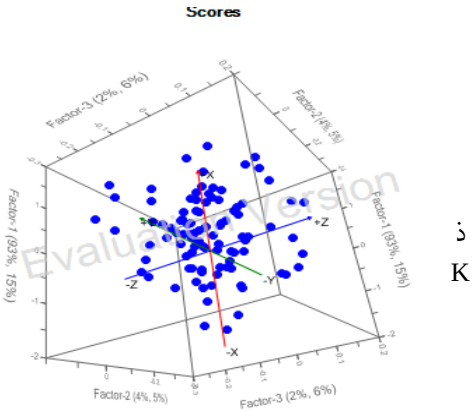
د
J



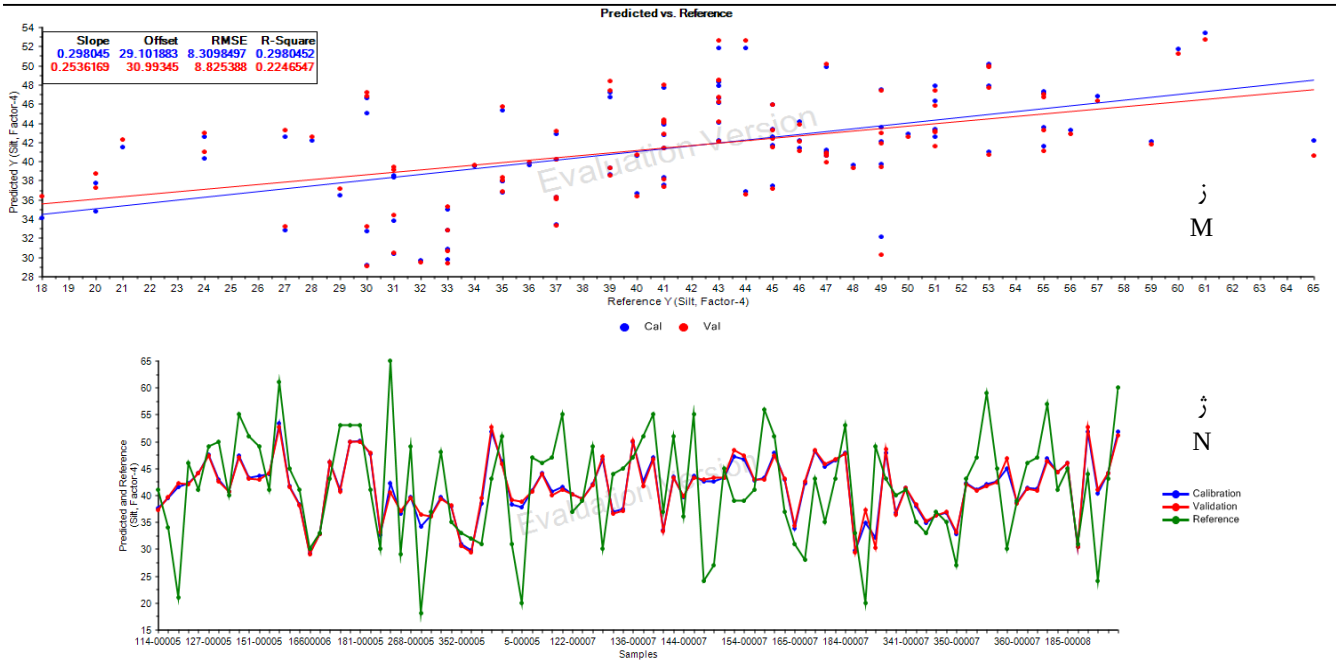
خ
I



ر
L



ذ
K



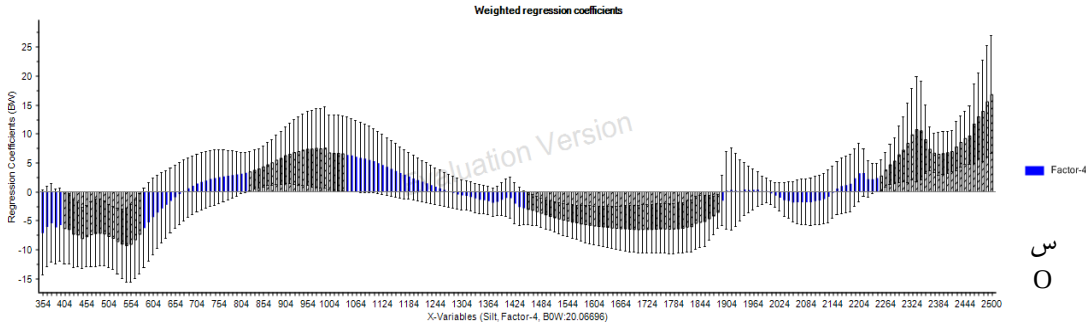
ز
M

ژ
N

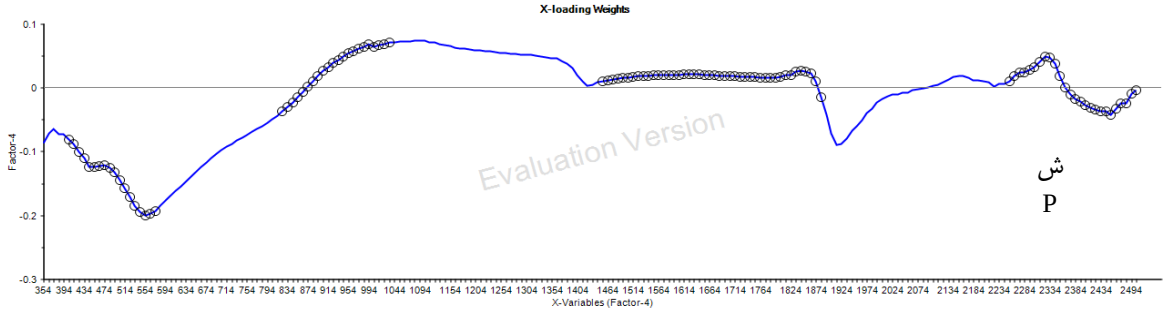
ادامه شکل ۳- خروجی مدل: عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLSR: خ) آزمون هتلینگ و نسبت آن با باقیمانده‌ها (F-residuals)؛ د) آمارهٔ هتلینگ (LV=4) به ازای نمونه‌ها؛ ذ/ر) نحوهٔ عملیات امتیازبندی فاکتورهای منتخب برای: فاکتورهای اول، دوم، سوم/ فاکتورهای چهارم، پنجم، ششم؛ ز) نمودار مدل واسنجی‌شدهٔ تخمین‌گر سیلت بر اساس: نسبت مقادیر تخمینی در مجموعهٔ واسنجی به مقادیر مرجع (عملیات اعتبارسنجی به روش LOOCV)؛ ژ) مقایسهٔ مقادیر مرجع و تخمینی در نمونه‌های ست واسنجی

Continued Figure 3. Model output: principal components analyses of PLSR, I) F-residuals of Hotelling test, J) Hotelling stat's (LV=4); K) Scoring of selected components for first, second and third factors, L) Scoring for fourth, fifth and sixth factors, M) Diagram of calibrated silt predicting model based on predicted vs reference values (LOOCV), N) Comparison of reference and estimated values in calibration set

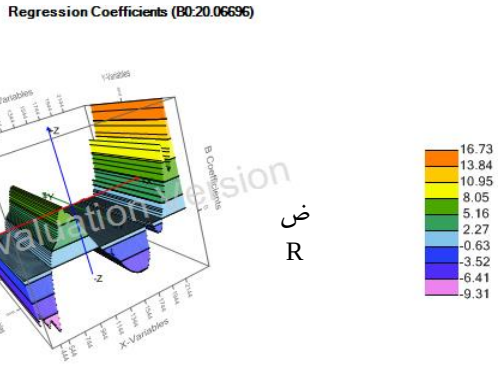
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]



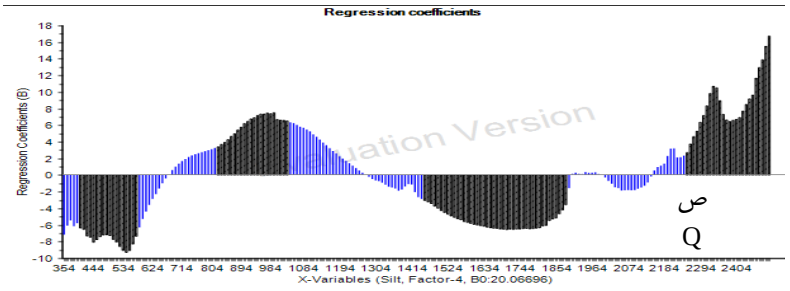
س
O



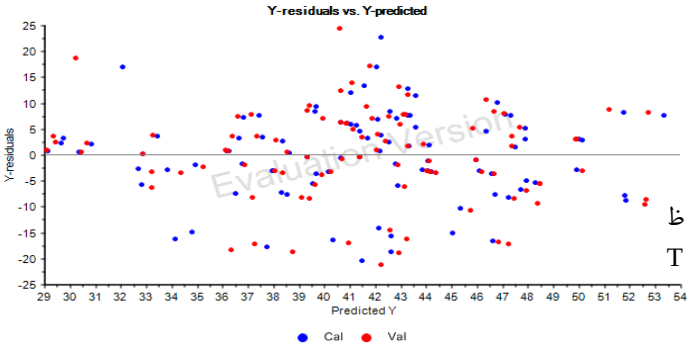
ش
P



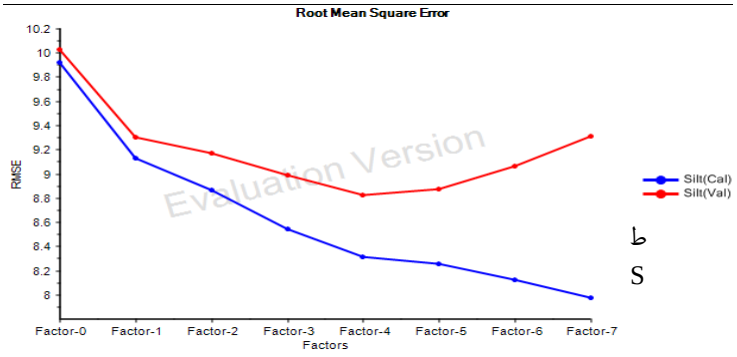
ض
R



ص
Q



ظ
T

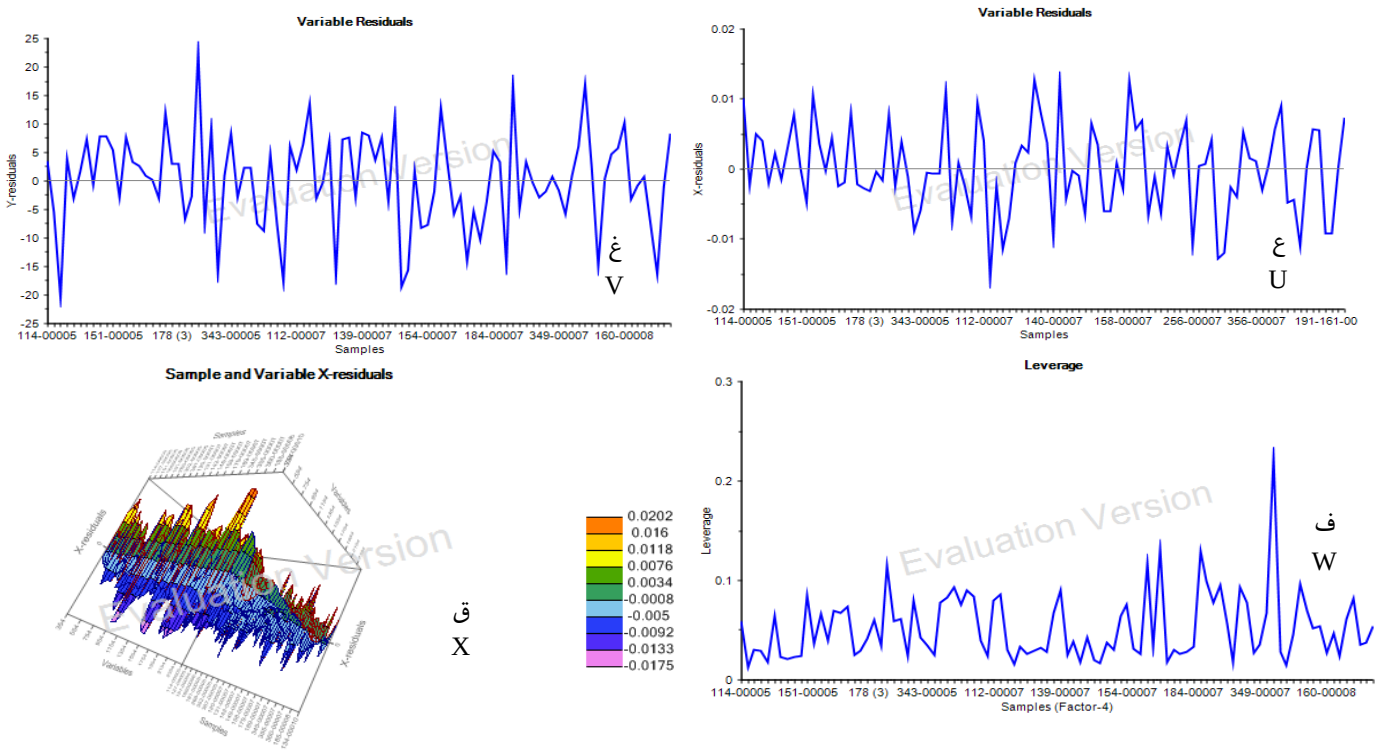


ط
S

ادامه شکل ۳- خروجی مدل: عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLSR: مشخص‌سازی باندهای طیفی مهم در واسنجی مدل سیلت منطقه، بر اساس: س) ضرایب وزنی رگرسیونی(B_w)؛ ش) وزن بارهای طیفی (spectral loading weights) نسبت به ۴ مؤلفهٔ اول مدلینگ؛ ص) ضرایب رگرسیونی ساده (B_0) ض) نمودار ماتریسی روابط بین متغیرهای مستقل، وابسته و ضرایب رگرسیونی (در تعیین باندهای طیفی مؤثر در پروسهٔ تخمین مقادیر سیلت خاک منطقه)؛ ط) میانگین مربعات خطا بر مبنای تعداد متغیرهای پنهان؛ ظ) نسبت بین مقادیر باقیمانده و مقادیر تخمینی در مدل واسنجی شدهٔ سیلت

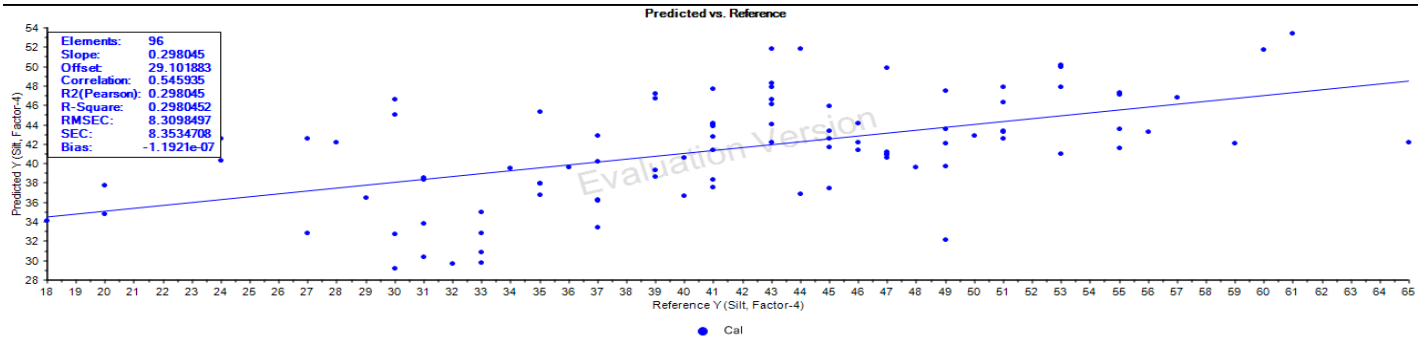
Continued Figure 3. Model output: principal components analyses of PLSR, O) Characterization of important spectral bands in calibrating regional model of silt based on b-coefficients, P) Spectral loading weights (LV=4), Q) Simple b-coefficients, R) Matrix diagram of relationships between b-coefficients, dependent and independent variables (characterization of effective spectral bands in modeling process of silt prediction), S) Averaged squares of error by LVs, T) the ratio between residuals and predicted values in silt calibrated model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]



ادامه شکل ۳- خروجی مدل: عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLSR: ع/غ)باقیمانده‌های متغیرها بر اساس متغیرهای غیر-وابسته/متغیرهای وابسته(مقادیر سیلت)؛ ف)نمودار لوریج بر مبنای نمونه‌ها؛ ق)نمودار ماتریسی بر اساس نمونه‌ها(متغیرهای وابسته)، متغیرهای مستقل و بقایای آن‌ها

Continued Figure 3. Model output: principal components analyses of PLSR, U) Residuals of variates by independent variables, V) Residuals of variates by dependent variables (silt content), W) Leverage chart on samples, X) Matrix chart on samples (dependent variables), independent variables and their residues



شکل ۴- خروجی مدل: مدل تخمین‌گر نهایی سیلت بر اساس نمونه‌های واسنجی: مقادیر تخمینی در قیاس با مقادیر مرجع سیلت، همراه با پارامترهای مدل تخمین‌گر سیلت (LF=4)

Figure 4. Model output: The final silt predictive model based upon the samples of calibration subset: predicted vs measured silt values with model specifications (LF=4)

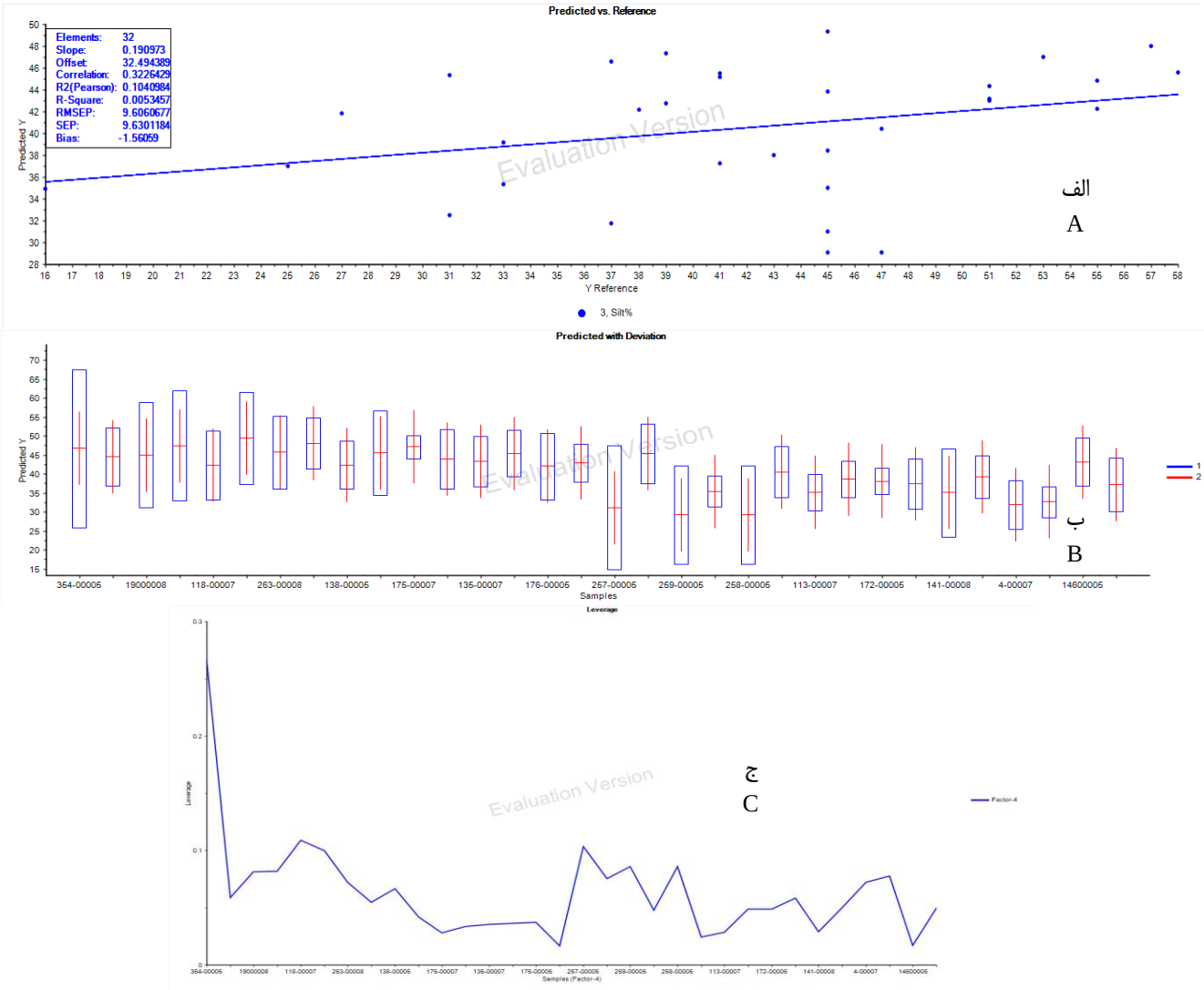
همچنین، دامنه‌های طیفی و طول‌موج‌های مؤثر جهت بررسی علائم و رفتارهای طیفی سیلت منطقه، بر مبنای: ضرایب بتا (b-coef.)، آنالیز وزنی و نیز با استفاده از تست عدم قطعیت مارتن، تعیین و محاسبه گردید (شکل۳-س،ش،ص،ض). بدین ترتیب مؤثرترین دامنه‌های طیفی در برآورد اجزای سیلتی خاک نیز مشخص شدند، که بر این اساس: دامنه‌های بازتابی مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه، در بررسی اجزای سیلت خاک‌های استان مازندران، نقش مهمی ایفا کرده‌اند (شکل۳- س،ش،ص،ض). بعلاوه، تست نرمال بودن مقادیر باقیمانده بر اساس ۴ مؤلفهٔ اصلی و نیز مقایسهٔ مقادیر باقیمانده نسبت به مقادیر تخمین‌شده حاکی از کیفیت نسبتاً متوسط الی ضعیف مدل تخمین‌گر سیلت در خاک‌های استان مازندران، داشته است (شکل۳-ز،ژ،ط،ظ). همچنین، بر اساس آزمون IFt و نیز بررسی واریانس باقیماندهٔ نمونه‌ها در مجموعهٔ واسنجی (متغیرهای پاسخ و تخمین‌گر)، مشخص شد که غالب نمونه‌ها در رنج نرمال تأثیر قرار داشته

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

(شکل۳–ح،خ،د،ذ،ر) و بدین ترتیب، نهایتاً؛ مدل تخمین‌گر مقادیر سیلت استان مازندران بر اساس ۴ مؤلفهٔ اصلی، با این مشخصات، واسنجی گردید: R_C : ۰/۵۵، R^2_C : ۰/۳۰، $RMSE_C$: ۸/۳۱، SE_C : ۸/۳۵ و شیب تقریبی ۰/۲۹۸ (شکل ۴)، که به‌عنوان مطلوب‌ترین مدل برآوردکنندهٔ مقادیر سیلت خاک‌های استان مازندران، شناخته شد (شکل۳– ز،ژ، شکل ۴). مشخصات مدل برآوردکنندهٔ نهایی مقادیر سیلت استان مازندران و نیز نتایج آماری فاکتورهای محاسبه شدهٔ مدل، در شکل ۴، گردآوری شده است. بر این اساس، دقت، کیفیت و صحت مدل نهایی واسنجی‌شدهٔ سیلت در خاک‌های استان مازندران، با دو شاخص آماری تحلیل‌گر: RPD و RPIQD، مورد ارزیابی واقع شدند. بدین ترتیب: بر اساس LF=4 در زیرمجموعهٔ واسنجی؛ RPD_C : ۱/۲۰ و $RPIQ_C$: ۱/۷۱ بوده است، که نشان دهندهٔ دقت متوسط الی ضعیف مدل می‌باشد.

عملیات اعتبارسنجی مدل تخمین‌گر سیلت

صحت‌سنجی مدل تخمین‌گر، با استفاده از ۳۲ نمونهٔ مستقل، انجام شد. شکل ۵، بیان‌گر مقادیر تخمین‌زده شده در مقایسه با مقادیر مرجع می‌باشد، که بر اساس LV=4 محاسبه شده است (شکل۵–الف). همچنین نمودارهای مقادیر تخمین شده در دامنهٔ انحراف معیار آن‌ها نیز، ترسیم و محاسبه گردید (شکل۵–ب). نتایج صحت‌سنجی مدل، بدین ترتیب بوده است: R_P: ۰/۳۲، R^2_P: ۰/۱۰، $RMSE_P$ ۹/۶۱ ٪، SE_P: ۹/۶۳ و bias ۱/۵۶– (شکل۵ و جدول۲). به همین ترتیب، مقادیر لوریج بر اساس تست لوریج تعدیل‌شده، برای مؤلفهٔ چهارم به ترتیب شکل۵–ج، محاسبه گردید. به‌علاوه؛ شاخص‌های RPD_P و $RPIQ_P$، به‌عنوان پارامترهای صحت و قدرت مدل در زیرمجموعهٔ اعتبارسنجی مستقل (LV=4)، نیز به‌ترتیب، ۱/۰۲ و ۱/۱۴ محاسبه گردید که حاکی از ضعیف بودن مدل تخمین‌گر در مرحلهٔ صحت‌سنجی، بوده است. در نهایت؛ مشخص شد که مقادیر سیلت در نمونه‌های مستقل، بطور ضعیفی قابل تخمین بوده‌اند (شکل ۵، جدول ۲).



شکل ۵ – خروجی مدل: عملیات اعتبارسنجی مدل سیلت: الف)مقادیر تخمینی در مقایسه با مقادیر مرجع؛ ب)نسبت مقادیر تخمین زده شده بهمراه مقادیر خطا در نمونه‌های مستقل؛ ج) مقادیر لوریج محاسباتی بر اساس نمونه‌های اعتبارسنجی (فاکتور چهارم)

Figure 5. Model output: Validation of silt predicting model: A) predicted vs measured values, B) predicted values with errors in standalone set, C) calculative leverages on validation samples (LV=4)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

جدول۲- خروجی مدل: مشخصات آماری عملیات اعتبارسنجی مدل تخمین‌گر سیلت، بر اساس نمونه‌های مستقل
Table 2. Model output: statistical characteristics of the validation of silt predicting model on standalone sample-set

Prediction di		RMSEP	SEP	Bias	Slope	Offset	Correlation	SEPCorr	ICM_Slope	ICM_Offset
Silt%		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factor-1	1	9.3055	9.4377	-0.5520	0.1478	35.3203	0.3111	9.3003	0.6549	14.8890
Factor-2	2	9.0996	9.1723	-1.1401	0.1901	32.9534	0.3737	9.0769	0.7348	11.9992
Factor-3	3	9.0126	8.8423	-2.3416	0.2326	29.9600	0.4383	8.7959	0.8258	9.2658
Factor-4	4	9.6061	9.6301	-1.5606	0.1910	32.4944	0.3226	9.2626	0.5451	19.9993

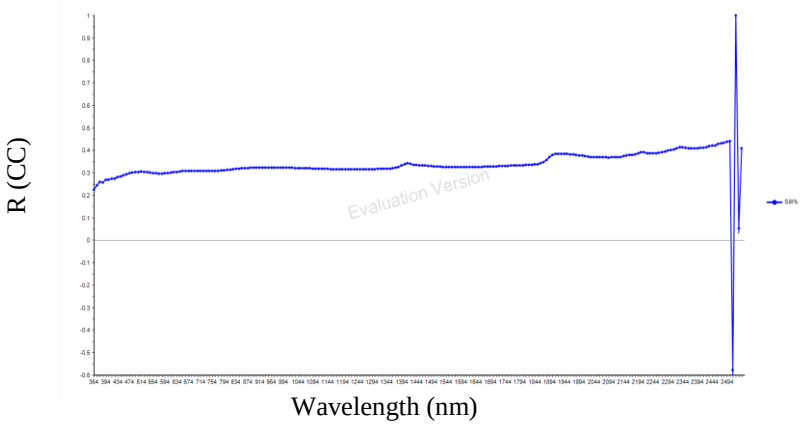
در تحقیق حاضر، همچون تحقیقات انجام شده توسط زنگ و همکاران (۳۲)، ژائو و همکاران (۳۳)، سورنسن و همکاران (۲۷)، ژو و همکاران (۳۰،۳۱)، پنگ و همکاران (۲۱)، باندها و پدیده‌های جذبی طیفی (SABs/SAFs) که بیان‌گر رفتارهای طیفی خصوصیات خاک می‌باشد: در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر به وضوح قابل رؤیت بوده‌اند که به‌سبب حضور ترکیبات تون‌های ترکیبی (combination tones) حاصل از حضور Al-OH، پدیده‌های فرعی حاضل از مولکول‌های آب و نیز حضور فعال گروه هیدروکسیل، بعنوان مهمترین پدیده‌های طیفی تشخیصی، جهت عملیات مدلینگ در دامنهٔ بارتابی مورد بررسی (Vis-NIR-SWIR)، بوده است. پنگ و همکاران (۲۱)، توانستند مقادیر سیلت در منطقهٔ شاندونگ چین را با استفاده از فن آوری مجاورت‌سنجی و الگوریتم پیشرفتهٔ PLS، با ضریب تبیین حدود ۰/۵۶ الی ۰/۷۰، مورد مطالعه و تخمین قرار دهند، که نسبت به تحقیق حاضر، دارای دقت بالاتری بوده است. دلیل آن، بهره بردن از مدل‌های ابرطیفی کلاستر (SCBMs) و نیز تغییرات مناسب پارامتر سیلت، بوده است. همچنین، ژو و همکاران (۳۰،۳۱)، توانستند با بهره‌گیری از تکنیک SR (نسبت انتخاب باندی) و بهره‌برداری از مجاورت سنجی و الگوریتم pls، مقادیر سیلت منطقه را با ضریب تبیین حدود ۰/۶۰ و RPD حدود بیش از ۱/۴ مورد بررسی قرار دهند که دارای دقت بالاتری نسبت به‌تحقیق حاضر بوده است. دلیل آن، تغییر بسیار بالای مقادیر سیلت (بالا بودن CV سیلت در منطقه نسبت به پژوهش حاضر و عدم وجود حالت "مالتی مدال" در توزیع پارمتر سیلت) و نیز بهره‌گیری از تکنیک ادغامی selective ratio+pls بوده است. همچنین زنگ و همکاران (۳۲) با تکنیک ادغامی pls و مجاورت سنجی، توانستند ذرات سیلت را با ضریب تبیین تعدیل شده ($adjusted\ R^2$) حدود ۰/۷۸ و RPD تقریبی ۲/۱۱ تعیین کنند که دارای دقت بسیار بالاتری، نسبت به مدل بدست آمده در تحقیق حاضر بوده است. دلیل آن بهره بردن از الگوریتم ten-fold cross validated pls modelling بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی علائم و رفتارهای طیفی اجزای سیلت خاک استان مازندران با استفاده از فن‌آوری نوین طیفی، در ادغام با روش تحلیل آماری-طیفی PLSR انجام شد. عملیات مدلسازی مقادیر سیلت، بر مبنای ست واسنجی شامل ۹۶ نمونه، و نیز ست اعتبارسنجی بر اساس ۳۲ نمونهٔ مستقل، انجام و مشخص شد که از بین حداکثر ۷ متغیر پنهان، چهار مؤلفهٔ اول می‌توانند سیلت را در خاک‌های منطقه برآورد کنند. بنابراین، فرآیند واسنجی مدل سیلت بر مبنای ۴ فاکتور نخست، و روش اعتبارسنجی متقاطع کامل با متد حذف تکی کامل (FLOOCV)، انجام پذیرفت. زیرا، بر اساس شکل ۳، چهار فاکتور نخست قادرند بیش از ۳۰٪ واریانس اطلاعات متغیرهای سیلت و بیش از ۹۵٪ واریانس اطلاعاتی متغیرهای ابرطیفی را در خود متمرکز سازند (شکل۳-الف،ب،پ،ت،ث،ج،چ،ح). بهترین مدل واسنجی‌شدهٔ تخمین سیلت نیز با این مشخصات حاصل شد: R_C: ۰/۵۵، R^2_C: ۰/۳۰، $RMSE_C$: ۸/۳۱ و SE_C: ۸/۳۸ (شکل۳- ز، ژ و شکل۴). ضرایب همبستگی مقادیر سیلت با دامنه‌های طیفی مؤثر نیز بدین ترتیب محاسبه شدند: UV ۳۹۰ نانومتر: ۰/۲۷، Vis ۶۸۰ نانومتر: ۰/۳۱، NIR ۹۷۰ الی ۹۹۰ نانومتر: ۰/۳۲، SWIR: باندهای ۱۴۰۰ الی ۱۴۱۰ نانومتر: ۰/۳۴، ۱۹۱۰ الی ۱۹۳۰ نانومتر: ۰/۳۸، ۲۲۰۰ الی ۲۲۱۰ نانومتر: ۰/۳۹، ۲۳۴۰ الی ۲۳۵۰ نانومتر: ۰/۴۱ و نیز ۲۴۳۰ الی ۲۴۶۰ نانومتر: ۰/۴۳ بوده است، که این باندهای طیفی تعیین شده (شکل۳-س،ش،ص،ض، شکل۶)؛ با بیشترین مقادیر همبستگی ($R(CC_{max})$)، حاکی از نفوذ و تأثیر بالای آن‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل تخمین‌گر، در فرآیند ایجاد مدل پارامتر سیلت در استان مازندران، بوده‌اند. باندهای طیفی مؤثر بدست آمده (شکل ۶)، در تطابق کامل با طول‌موج‌های بدست آمده از تحقیقات ژو و همکاران (۳۰)، ژائو و همکاران (۳۳) و پنگ و همکاران (۲۱) بوده است. به‌همین ترتیب، کامبیول و همکاران (۵)، ژو و همکاران (۳۰،۳۱)، ژائو و همکاران (۳۳)، پنگ و همکاران (۲۱)، نیز مؤثرترین طول‌موج‌ها در ایجاد بهترین مدل بررسی خاک را در اطراف ۱/۴، ۱/۹ و ۲/۲ میکرومتر عنوان کردند، که متناظر با حضور گروه‌های OH رطوبت خاک و آب موجود در شبکه‌های کریستالی مینرال های رسی گزارش شده‌اند که در تطابق با نتایج تحقیق حاضر، بوده است. لذا، دامنه‌ها و محدوده‌های طیفی مؤثر در فرآیند مدل‌سازی سیلت بر اساس روش PLSR، نیز بدین صورت تعیین شدند: مرئی: ۴۴۰ الی ۵۸۰ نانومتر، مادون قرمز نزدیک: ۸۹۰ الی ۹۹۰ نانومتر، مادون قرمز موج‌کوتاه از ۱۶۲۰ الی ۱۹۰۰ نانومتر و نیز ۲۲۴۰ الی ۲۴۳۰ نانومتر (شکل ۳-س،ش،ص،ض، شکل ۶). دامنه‌های طیفی بدست آمده در مطالعهٔ اجزای سیلت استان مازندران، در تطابق با دامنه‌های بازتابی کورسیو و همکاران (۷)، بوده است. به گونه‌ای‌که ایشان در بررسی اجزای بافت با تکنیک CRT، محدوده‌های بازتابی مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج‌کوتاه را بعنوان دامنه های مؤثر در بررسی اجزای بافت، بیان کردند. همچنین؛ بر اساس آزمون‌های: هتلینگ، لوریج تعدیلی و واریانس باقیمانده، کیفیت مدل واسنجی‌شدهٔ سیلت، مورد بررسی واقع شد (شکل۳- ح،خ،د،ذ،ر،ط،ظ،ع،غ،ف،ق). نتایج اعتبارسنجی مدل سیلت منطقهٔ مورد مطالعه، بر اساس ۳۲ نمونهٔ مستقل

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

(شکل۵، جدول۲)، شاخص‌های نشان‌دهندهٔ کیفیت، قدرت و کفایت مدل حاصله، در زیرمجموعهٔ واسنجی: RPD_C=1.20، $RPIQ_C$=1.71، و نیز زیرمجموعهٔ اعتبارسنجی: RPD_P=1.02، $RPIQ_P$=1.14؛ بیان‌گر کیفیت و قدرت متوسط الی ضعیف مدل در فرآیند تخمین سیلت در خاک‌های استان مازندران، بوده است که دلیل آن را می‌توان در کم بودن تغییرات و دامنهٔ مقادیر سیلت و نیز وجود حالت مد چندگانه (multi-modal) دانست. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌ها، قادر به تخمین متوسط الی ضعیفی از اجزای سیلت، در خاک‌های استان مازندران بوده‌اند. البته اندک مطالعات انجام شده در زمینهٔ بررسی اجزای سیلت با داده‌های ابرطیفی، نیز عموماً حاکی از ضعیف بودن مدل‌های تخمین‌گر سیلت می‌باشد. بطوری‌که بیلگیلی و همکاران (۳) با تلفیق طیف سنجی و PLSR، به بررسی اجزای سیلت پرداختند که مدل مربوطه با R^2_C کمتر از ۰/۵۰ و RPD_C تقریبی ۱/۳۶، دارای توانایی ضعیفی در تخمین اجزای سیلت، در خاک‌های ترکیه بوده است. مدل تخمین‌گر گومز و همکاران (۹) نیز در بررسی سیلت، با کاهش چشم‌گیری در توانایی، روبرو بوده است. البته استنبرگ و همکاران (۲۸)، توانستند این جزء بافتی را با RMSE تقریبی ۷/۴ ٪ و RPD تقریبی ۱/۶، که حکایت از دقت متوسط مدل داشته است، برآورد کنند. در پایان، برای بهبود مدل‌های تخمین سیلت در منطقه، توصیه می‌شود از نمونه‌های حاوی دامنهٔ وسیع‌تری از سیلت و با ضریب تغییرات بیشتر جهت تقویت و ثبات مدل، استفاده گردد. زیرا، دامنهٔ محدود و مالتی مدال (multi-modal status) بودن مقادیر سیلت در تحقیق فعلی و نیز ضریب تغییرات کم که نشان از عدم تغییرات مناسب این پارامتر خاک داشته است (ضریب تغییرات: ۲۳/۸ درصد)، و نیز وجود اندکی چولگی و کشیدگی در منحنی توزیع آن، مانع از عملیات کالیبراسیون مناسب شده است. لذا، باید از نمونه‌هایی بهره جست که دارای تغییرات و دامنهٔ وسیع‌تری از این پارامتر باشند. نتیجهٔ تحقیق حاضر، مشخص شدن علائم و رفتارهای طیفی سیلت و نیز دامنه‌های طیفی مؤثر و طول‌موج‌های دخیل در فرآیند مدلینگ سیلت بر مبنای روش طیف‌سنجی بازتابی را در پی داشته است که می‌تواند پایه و اساس روش های آتی سنجش این پارامتر مهم در خاک‌های استان مازندران واقع گردد.



شکل۶- نمودار همبستگی دوطرفهٔ پیرسون ((R(CC)) بین: اجزای فعال طیفی خاک (پارامتر سیلت) و باندهای ابرطیفی بازتابی نمونه‌های منطقهٔ مورد بررسی

Figure 6. Correlogram of two-tailed Pearson coefficient between the active soil spectral constituent (the silt parameter) and the reflected hyperspectral bands of samples in the study area

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری‌های ارزندهٔ دانشگاه‌های تربیت مدرس، علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و نیز سازمان جهاد کشاورزی استان مازندران، صمیمانه تشکر می‌گردد.

اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده و این موضوع مورد تایید همهٔ آن‌ها می‌باشد.

منابع

1. Adeline, K.R.M., C. Gomez, N. Gorretta and J.M. Roger. 2017. Predictive ability of soil properties to spectral degradation from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. Geoderma. 288: 143-153.
2. Askari, M.S., J. Cui, S.M. O'Rourke and N.M. Holden. 2015. Evaluation of soil structural quality using VIS–NIR spectra. Soil and Tillage Research, 146: 108-117.
3. Bilgili, A.V., H.M. van Es, F. Akbas, A. Durak and W.D. Hively. 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. Journal of Arid Environments, 74(2010): 229-238.
4. Camargo, O.A., A.C. Moniz, J.A. Jorge and J.M. Valadares. 2009. Methods of Chemical, Mineralogical and Physical Analysis of Soils Used in the Pedology Section (Technical Bulletin n.106), Instituto Agronômico (IAC), Campinas.
5. Cambule, A.H., D.G. Rossiter, J.J. Stoorvogel and E.M.A. Smaling. 2012. Building a near infrared spectral library for soil organic carbon estimation in the Limpopo National Park, Mozambique. Geoderma, 183-184 (2012): 41-48.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

6. Casa, R., F. Castaldi, S. Pascucci, A. Palombo and S. Pignatti. 2013. A comparison of sensor resolution and calibration strategies for soil texture estimation from hyperspectral remote sensing. Geoderma, 197: 17-26.
7. Curcio, D., G. Ciraolo, F. D'Asaro and M. Minacapilli. 2013. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. Procedia Environmental Sciences, 19(2013): 494-503.
8. Danesh, M., H.A. Bahrami, R. Darvishzadeh and A.A. Noroozi. 2016. Investigating clay contents using laboratory diffuse reflectance spectroscopy. Iranian Journal of RS&GIS, 8(1): 71-94 (In Persian).
9. Gomez, C., Y. Le Bissonnais, M. Annabi, H. Bahri and D. Raclot. 2013. Laboratory Vis–NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. Geoderma, 209-210(2013): 86-97.
10. Greppi, G.F., S. Mura, D. Masci, L. De Cecco, S. Martini and F. Borfecchia. 2014. Analysis of soils in agriculture by hyperspectral imaging. Giornata mondiale del suolo–Workshop Il Suolo nella Pianificazione Territoriale, Alghero.
11. Guo, L., H. Zhang, T. Shi, Y. Chen, Q. Jiang and M. Linderman. 2019. Prediction of soil organic carbon stock by laboratory spectral data and airborne hyperspectral images. Geoderma, 337: 32-41.
12. Hong, Y., S. Chen, Y. Liu, Y. Zhang, L. Yu, Y. Chen and Y. Liu. 2019. Combination of fractional order derivative and memory-based learning algorithm to improve the estimation accuracy of soil organic matter by visible and near-infrared spectroscopy. Catena, 174: 104-116.
13. Jong, S.M.D., E.A. Addink, L.P.H. van Beek and D. Duijsings. 2011. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts. Catena, 86(2011): 24-35.
14. Magalhaes, L.de.O., L.C. Arantes and J.W.B. Braga. 2019. Identification of NBOMe and NBOH in blotter papers using a handheld spectrometer and chemometric methods, Microchemistry Journal, 144(2019): 151-158, https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.08.051.
15. Matney, T., L.R. Barrett, M.B. Dawadi, D. Maki, C. Maxton, D.S. Perry, D.C. Roper, L. Somers and L.G. Whitman. 2014. In situ shallow subsurface reflectance spectroscopy of archaeological soils and features: a case-study of two Native American settlement sites in Kansas. Journal of Archaeological Science, 43(2014): 315-324.
16. McDowell, M.L., G.L. Bruland, J.L. Deenik, S. Grunwald and N.M. Knox. 2012. Soil total carbon analysis in Hawaiian soils with visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma, 189-190(2012): 312-320.
17. Mura, S., C. Cappai, G.F. Greppi, S. Barzaghi, A. Stellari and T.M.P. Cattaneo. 2019. Vibrational spectroscopy and Aquaphotomics holistic approach to determine chemical compounds related to sustainability in soil profiles. Computers and Electronics in Agriculture, 159(2019): 92-96.
18. Ogen, Y., J. Zaluda, N. Francos, N. Goldshleger and E. Ben-Dor. 2019. Cluster-based spectral models for a robust assessment of soil properties, Geoderma, 340(2019): 175-184.
19. Ostovari, Y., S. Ghorbani-Dashtaki, H.A. Bahrami, M. Abbasi, J.A.M. Dematte, E. Arthur and P. Panagos. 2018. Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO 3 using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. Geoderma, 314: 102-112.
20. Padarian, J., B. Minasny and A.B. McBratney. 2019. Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data. Geoderma Regional, 16: e00198.
21. Peng, L., H. Cheng, L.J. Wang and D. Zhu. 2020. Comparisons the prediction results of soil properties based on fuzzy c-means clustering and expert knowledge from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. Canadian Journal of Soil Science, 101(1):33-44.
22. Pietrzykowski, M. and M. Chodak. 2014. Near infrared spectroscopy—A tool for chemical properties and organic matter assessment of afforested mine soils. Ecological Engineering, 62 (2014): 115-122.
23. Qi, F., R. Zhang, X. Liu, Y. Niu, H. Zhang, H. Li, J. Li, B. Wang and G. Zhang. 2018. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region. Soil and Tillage Research, 184: 45-51.
24. Rawlins, B.G., S.J. Kemp and A.E. Milodowski. 2011. Relationships between particle size distribution and VNIR reflectance spectra are weaker for soils formed from bedrock compared to transported parent materials. Geoderma, 166(2011): 84-91.
25. Santana, F.B., L.O. Giuseeppe, A.M. Souza and R.J. Poppi. 2019. Removing the moisture effect in soil organic matter determination using NIR spectroscopy and PLSR with external parameter orthogonalization. Microchemical Journal, 145(2019): 1094-1101.
26. Small, C., M. Steckler, L. Seeber, S.H. Akhter, Jr.S. Goodbred, B. Mia and B. Imam. 2009. Spectroscopy of sediments in the Ganges–Brahmaputra delta: Spectral effects of moisture, grain size and lithology, Remote Sensing of Environment, 113(2009): 342-361.
27. Sorenson, P.T., S.A. Quideau and B. Rivard. 2018. High resolution measurement of soil organic carbon and total nitrogen with laboratory imaging spectroscopy. Geoderma, 315: 170-177.
28. Stenberg, B., R.A. Viscarra Rossel, A.M. Mouazen and J. Wetterlind. 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. Advances in Agronomy, 107: 163-215.
29. 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(2011): 123-131.
30. Xu, D., W. Ma, S. Chen, Q. Jiang, K. He and Z. Shi. 2018a. Assessment of important soil properties related to Chinese Soil Taxonomy based on vis–NIR reflectance spectroscopy. Computers and Electronics in Agriculture, 144: 1-8.
31. Xu, S., Y. Zhao, M. Wang and X. Shi. 2018b. Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields by Vis–NIR spectroscopy. Geoderma, 310: 29-43.
32. Zeng, R., D.G. Rossiter, F. Yang, D.C. Li, Y.G. Zhao and G.L. Zhang. 2017. How accurately can soil classes be allocated based on spectrally predicted physio-chemical properties? Geoderma, 303(2017): 78-84.
33. Zhao, L., H. Hong, Q. Fang, T.J. Algeo, C. Wang, M. Li and K. Yin. 2020. Potential of VNIR spectroscopy for prediction of clay mineralogy and magnetic properties, and its paleoclimatic application to two contrasting Quaternary soil deposits. Catena, 184(2020): 104239.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]

Applicability of Proximal Sensing Technology in the study of Silt in the soils of Mazandaran Province

Majid Danesh[1], Hossein Ali Bahrami[2] and Seyed Mostafa Emadi[3]

1- Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, (Corresponding Author: m.danesh@sanru.ac.ir)
2- Professor, Department of Soil Science and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
3- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources
Received: 1 February, 2022 Received: 16 February, 2022

Extended Abstract

Introduction and Objective: Silt is one the most important constituents of soil texture that directly influence the soil erosion process and should take into account in many projects of soil erosion management and conservation. The study of this fraction using the traditional and prevalent lab methods, especially on large scales, is time-consuming, laborious and costly. Today, this can be done in a quick and cost-effective method applying new high-techs such as the spectroscopy technology. The present work intends to investigate the spectral behaviours of the soil silt fraction using the reflectance spectroscopy technology in Mazandaran province.

Material and Methods: Accordingly, 128 soil samples were collected from 20 cm of soil surface using the SRS method and auxiliary info-layers like as geology, pedology, landuse and road map of Mazandaran province. First, the sample set was sub-divided into two subsets: calibration and validation. Spectral signatures and domains specific to the silt components were detected and specified utilizing the PLSR and Cross-Validation techniques, as well, the hyperspectral pre-processing methods such as averaging, smoothing and 1st derivative algorithms based on the Savitzky-Golay Algorithm were done.

Results: Modeling process was done based on the PLS technique to investigate the spectral signatures and behaviours of silt constituents. The final model with 4 latent factors (LFs) was calibrated with these specs: Rc: 0.55, RMSEc: 8.31 %, RPDc: 1.20 and RPIQc: 1.71 and was eventually selected as the best model for studying the soil silt of Mazandaran province. Results showed the model potentiality in prediction of soil silt of the study area, as well, the most influential spectral domains and ranges were detected and recognized. The correlation coefficients of silt contents with the influential spectral ranges and wavebands were also defined as follows, UV-390 nm: 0.27, Vis-680 nm: 0.31, NIR-970 to 990 nm: 0.32, SWIR- 1400 to 1410 nm wavebands: 0.34, 1910-1930 nm: 0.38, 2200-2210 nm: 0.39, 2340-2350 nm: 0.41 and finally, for 2430-2460 wavebands calculated as 0.43. The obtained spectral wavebands with the highest correlation coefficients (R(CCmax)) indicate the high impact as the independent predictor variables in the processes of soil silt modeling of Mazandaran province. Finally, the capability of the proximal sensing of diffuse reflectance spectroscopy technology (VNIR-PS) was demonstrated in the study of silt contents of Mazandaran province.

Conclusion: In this approach, the spectral ranges and bands affected by the silt components were defined, in addition to the predictive modeling processes. That can be used as a basis for studying silt contents at large scales applying the upscaling operation via airborne/satellite hyperspectral data. Also, it indicates the importance of soil reflectance spectroscopy technology as a fundament for detecting and recognizing the useful and effective spectral wavelengths as well as creating the optimized model for the utilization by remotely sensed satellite data. Moreover, the use of data with higher coefficient of variation and greater amplitude is highly recommended to improve and boost the model preciseness so that, the PLS algorithm can process better.

K**eywords:** Digital mapping, PLSR, Proximal soil sensing, Silt, Upscaling

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.4.1]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.38]