



برآورد اجزای بافت خاک با استفاده از طیف‌های بازتابی مرئی-مادون قرمز در شرق استان مازندران

نسترن شیعی^۱، سید مصطفی عمادی^۲، مجید دانش^{۳*}، محمدعلی بهمنیار^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - ۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - ۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - ۴- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
- *مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی m.danesh@sanru.ac.ir

چکیده

بافت خاک، نقش بسیار مهمی در فرسایش‌پذیری خاک ایفا کرده و باید در بسیاری از پروژه‌های حفاظت خاک و عملیات مدل‌سازی محیط زیست، مد نظر قرار گیرد. روش‌های مرسوم تعیین بافت خاک غالباً پرهزینه و زمان‌بر بوده و گاهی سبب تخریب محیط زیست نیز می‌شوند. فن‌آوری طیف‌سنجی با استفاده از علائم طیفی در کل طیف بازتابی خاک، نویدبخش روشی کارآمد برای مطالعه اجزای خاک می‌باشد. برای این منظور، ۱۱۳ نقطه به‌طور تصادفی در شرق استان مازندران انتخاب و از عمق ۱۵-۲۰ سانتیمتری سطح خاک نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه: ۹۱ نمونه برای عملیات مدل‌سازی و ۲۲ نمونه برای فرآیند صحت‌سنجی، تقسیم شدند. با استفاده از الگوریتم پیشرفته PLSR (enhanced-pls) به‌همراه رویکردهای Full-Leave-One-Out Cross validation tech (FLOOCV)، تبدیلات طیفی و عملیات پیش‌پردازش طیفی، فرآیند مدل‌سازی هر یک از اجزای بافت خاک، انجام شد. از نظر طیفی، اجزای شن و رس خاک منطقه، با دقت بسیار بالایی با این مشخصات مدل شدند، برای اجزای شن: $R^2c=0.89$ (ضریب رگرسیون)، $RMSEc=7.42$ (مجدور میانگین خطا)، $SEc=7.46$ (خطای استاندارد)؛ و برای اجزای رس: $R^2c=0.82$ ، $RMSEc=6.88$ و $SEc=6.92$ به‌دست آمد. مؤثرترین دامنه‌های طیف‌سنجی دخیل در فرآیند مدل‌سازی، بر اساس تحلیل‌های وزنی طیفی، ضرایب بتا و نیز تست عدم قطعیت مارتن، آشکارسازی شد. همچنین مؤثرترین محدوده‌های بازتابش طیفی مختص منطقه شامل مرئی، مادون-قرمز نزدیک و موج‌کوتاه به‌همراه طول‌موج‌های مشخص، تشخیص داده شد. بر مبنای پژوهش حاضر، کارایی فن‌آوری طیف‌سنجی در مطالعه بافت خاک شرق استان مازندران، به اثبات رسید. با استفاده از مدل‌های طیفی حاصله، قادر خواهیم بود اجزای خاک را در وسعت‌های بسیار بالاتر با سرعت بیشتر، راحت‌تر، به‌روزتر و البته هزینه کمتر مورد بررسی و مطالعه قرار دهیم.

واژگان کلیدی: الگوریتم PLS، اجزای بافت، حفاظت خاک، طیف‌سنجی، رویکرد FLOOCV

Prediction of soil textural components using Vis-NIR reflectance spectra in the east of Mazandaran province

N. Shiati¹, S.M. Emadi², M. Danesh^{*3}, M.A. Bahmanyar⁴

Received: August 28, 2022

Accepted: January 3, 2023

1. MSc Grad. of Soil Science, SANRU

2. Associate Prof., Dept of Soil Science, SANRU

3. Assistant Prof., Dept of Soil Science, SANRU

4. Professor, Dept of Soil Science, SANRU

* Corresponding Author, Email: m.danesh@sanru.ac.ir

Abstract

Soil texture plays an essential role in erodibility and should be considered in many projects of conservation and environmental modeling process. Traditional methods of measuring soil texture are usually laborious, expensive and taking a lot of time meanwhile causing destructive effects on the environment. Spectroscopic technology using the spectral signatures from whole reflected spectra promises a competent method to study soil constituents. Hence, 113 points were selected and sampled randomly from 0-15 cm of soil surface in eastern parts of Mazandaran province. Samples were haphazardly divided into 91 for model building and 22 for final verification. Applying the enhanced PLS-algorithm plus the FLOOCV (full-leave-one-out cross validation tech) approach along with spectral transformations and pre-processing, the modeling of each textural components was accomplished. Spectrally, sand and clay fractions were modeled with high accuracy as following: regression coefficient (R^2c)=0.89, root mean square error (RMSEc)=7.42, standard error (SEc)=7.46 for sand content and R^2c =0.82, RMSEc=6.88, SEc=6.92 for clay content. The most effective spectral ranges involved in the modeling process, were also detected and recognized based on beta & spectral weight analyses and Marten's uncertainty test. Additionally, the most influential spectroscopic ranges were included the visible, NIR and SWIR regions with the specified wavelengths. In general, the efficacy of spectroscopic technology in soil texture studies has been proven by this research. Using the computed spectral models, we are able to study the soil textural components at large area faster, safer, timelier and also cheaper. That is absolutely true and applicable using the regionalized remotely sensed data but requires further investigation in different geographical areas.

Keywords: PLS-algorithm, Textural constituents, Soil conservation, Spectroscopy, FLOOCV approach

مقدمه

اجزای بافت خاک نقش‌های بسیار اساسی و بنیادین را در پهنه وسیعی از خصوصیات خاک ایفا می‌کنند. به مفهوم دیگر، بافت خاک با بسیاری از خصوصیات خاک مرتبط بوده و به شدت بر آن‌ها اثرگذار است. برای مثال، اجزای تشکیل دهنده بافت خاک، به‌طور مستقیم بر تشکیل خاک‌دانه و نیز ساختمان خاک، تأثیر می‌گذارند. از این‌رو، این بافت خاک، باید در بسیار از طرح‌ها و پروژه‌های مدیریت فرسایش^۱، حفاظت و نیز مدل‌سازی زیست-محیطی^۲، مورد توجه قرار گیرد. به‌علاوه، اطلاع از وضعیت اجزای بافت و نحوه توزیع اندازه ذرات خاک، در سیاست‌های تصمیم‌گیری با هدف حاصل‌خیزی و بارآوری خاک^۳، حفاظت محیط زیست^۴ و نیز مدیریت و توسعه پایدار کشاورزی^۵، امری ضروری است (کی و همکاران ۲۰۱۸). به ویژه، خصوصیات بافت خاک نقش بسیار بارز و مؤثری را در برنامه‌های مدیریتی حفاظت خاک به‌ویژه در مناطق مستعد انواع فرسایش، ایفا می‌کند (استواری و همکاران ۲۰۱۸). البته تعیین اجزای تشکیل دهنده خاک به ویژه در مقیاس‌های بسیار وسیع، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی رایج^۶، معمولاً گران، خسته‌کننده، وقت‌گیر، انرژی‌بر و نیز مخرب محیط زیست خواهد بود (پنگ و همکاران ۲۰۲۰؛ بهرامی و همکاران ۲۰۲۲). بنابراین، وجود رویکردی با دقت بالا، سریع، ساده و کم-هزینه برای مطالعه این خصوصیات خاک (اجزای بافت)، به‌طور حتم، لازم و ضروری است. برای این منظور، رویکرد فن‌آوری‌های پیشرفته^۷ که با طیف‌های بازتابش-

شده از سطح خاک کار می‌کنند، همچون فن‌آوری طیف-سنجی غالباً روشی سریع، ارزان، در دسترس، قابل تکرار، حداقل نیاز به آماده‌سازی نمونه (یا حتی فاقد آن) و نیز بدون تخریب محیط زیست می‌باشند (ژائو و همکاران ۲۰۲۰؛ پنگ و همکاران ۲۰۲۰). لذا، این رویکرد مدرن^۸ و پیشرفته، به دلایل غیرتخریبی بودن، ساده بودن، بهنگام بودن^۹ و نیز به‌صرفه از نظر هزینه، بیش از پیش مورد استفاده قرار گرفته و مشهور شده است (جی و همکاران ۲۰۱۶، ژو و همکاران ۲۰۱۸). همچنین این فن-آوری می‌تواند بعنوان مکمل و یا جایگزین روش‌های سنتی و مرسوم تشخیص اجزای خاک، مد نظر قرار گیرد. منحنی بازتاب طیفی^{۱۰}، همچون امضاء و اثر انگشت برای هر خاک می‌باشد که با بکارگیری دستگاه طیف‌سنجی^{۱۱}، محاسبه و ترسیم می‌گردد (دانش و همکاران ۲۰۲۲). بر این اساس، پدیده‌ها و مشخصات طیفی^{۱۲} موجود در طیف-های بازتابش‌شده، می‌توانند به خصوصیات و ویژگی-های مختلف خاک همچون ترکیب ذرات خاک^{۱۳}، مرتبط شوند (ژو و همکاران ۲۰۱۸؛ پادریان و همکاران ۲۰۱۹). شیوه طیف‌سنجی به نحوی تدارک شده است که به خوبی به صورت دستی یا قابل حمل^{۱۴}، در میدان و نیز آزمایشگاه، قابلیت استفاده دارد. قاعدتاً رویکرد طیف-سنجی، اکتشاف و شناسایی اثرات متقابل و واکنش‌های مواد خاک در برخورد با نور برخوردی^{۱۵} به آن در یک دامنه طیفی مشخص، می‌باشد. در واقع، این فن‌آوری از پدیده‌های ترکیبی و فرعی^{۱۶} حاصل از ارتعاشات بنیادین^{۱۷} تولید شده در اثر پدیده جذب طیفی مولکولی، در دامنه مادون قرمز میانی^{۱۸} (MIR)، بهره می‌برد (مورا

¹⁰- Spectral reflectance curve

¹¹- Spectroscopic device

¹²- Spectral features & signatures

¹³- Soil particle composition

¹⁴- Handheld or portable

¹⁵- Incident light

¹⁶- Overtones and combinations

¹⁷- Fundamental vibration

¹⁸- Mid Infrared

¹- Soil erosion management

²- Environmental Modelling Process

³- Soil productivity

⁴- Environmental support

⁵- Sustained management & development of agriculture

⁶- Conventional laboratory methods

⁷- High-techs approach

⁸- State-of-the-art approach

⁹- Timely & real time

و همکاران ۲۰۱۹). پدیده‌های فرعی و ترکیبی، به‌طور طیفی، در دامنه‌های مادون قرمز نزدیک و موج‌کوتاه رخ می‌دهند که در ارتباط مستقیم با حالات ارتعاشی^۱ گروه‌ها و پیوندهای فعال، عاملی و ساختاری^۲ همچون $-CH$ ، $-NH$ و $-OH$ می‌باشد (مورا و همکاران ۲۰۱۹). از نظر محاسباتی و ریاضی، تا کنون مدل‌های طیفی مختلفی برای برقراری ارتباط بین خصوصیات خاک و داده‌های طیفی بازتاب شده، مورد آزمون و استفاده، واقع شده‌اند. غالب این مدل‌های طیفی، برای کشف اطلاعات دقیق‌تر از اجزای تشکیل دهنده خاک، برنامه‌نویسی شده‌اند (هنگ و همکاران ۲۰۱۹). از میان آن‌ها، الگوریتم PLS یا حداقل مربعات جزئی، بدلیل دارا بودن شیوه تحلیل چند متغیره^۳ قوی، بسیار متداول بوده و بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرا این الگوریتم به راحتی خطاهای مشترک (چند-همخطی)^۴ را مدیریت کرده و نیز داده‌های طیفی با ابعاد بسیار بالا^۵ را نیز به راحتی کنترل می‌کند (گو و همکاران ۲۰۱۹؛ پنگ و همکاران ۲۰۲۰). توانایی تخمین و برآورد خصوصیات از خاک همچون ماده آلی خاک (SOM)، رس، رطوبت و غیره، با کمک فن‌آوری طیف‌سنجی، در برخی از مطالعات انجام شده، گزارش شده است (ژیا و همکاران ۲۰۱۵؛ دانش و بهرامی ۲۰۲۲؛ دانش و همکاران ۲۰۲۲). نکته قابل توجه این است که چندین خصوصیت خاک می‌تواند به‌طور هم‌زمان و با یک اسکن ساده توسط ابزار طیف‌سنجی، مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. ژو و همکاران (۲۰۱۸)، با بهره‌گیری از تکنیک طیفی در دامنه مرئی تا مادون قرمز نزدیک، به ارزیابی و تشخیص ویژگی‌های مهم خاک مرتبط با سیستم طبقه‌بندی خاک چین، با موفقیت مبادرت ورزیدند. روی‌هم‌رفته، بر اساس گزارشات مختلف، این شیوه سنجش بازتاب طیفی مبتنی بر رویکرد طیف‌سنجی

ارتعاشی^۶، جای‌گزینی بسیار مفید و مؤثر برای تجزیه و تحلیل‌های رایج آزمایشگاهی، تشخیص داده شد، و این درحالیست که این رویکرد می‌تواند چندین ویژگی خاک را نیز، به‌طور هماهنگ و هم‌زمان مورد آزمون قرار دهد (ویسکارا راسل و وبستر ۲۰۱۲؛ جی و همکاران ۲۰۱۴). همچنین برخی از خصوصیات مهم خاک، با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در ادغام با الگوریتم PLS^۷، مدل شده که کارایی آن‌ها نیز بسیار رضایت‌بخش ارزیابی شدند (پودلکو و چوداک ۲۰۲۰؛ پنگ و همکاران ۲۰۲۰). البته، اخیراً مطالعات و تحقیقات بیشتر بر روی استفاده از شیوه مذکور، کانون توجه غالب پژوهش‌ها بوده است. تومساواس و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی کارایی قابلیت استفاده از شیوه طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در ارزیابی اجزای بافت خاک در ترکیه پرداختند. ضریب رگرسیون و نیز شاخص RPD^8 برای مدل‌سازی اجزای خاک^۹ نسبتاً زیاد و رضایت‌بخش بوده است. پنگ و همکاران (۲۰۲۰)، به مقایسه روش‌های ارزیابی و تخمین خصوصیات خاک مبتنی بر طیف‌سنجی پرداختند و به شاخص‌های بالای ارزیابی برای مدل‌های طیفی بافت خاک مناطق مختلف چین، دست پیدا کردند. همچنین، دانش و همکاران (۲۰۲۲) و بهرامی و همکاران (۲۰۲۲)، به ارزیابی عملکرد و کارایی طیف‌سنجی بازتابی ارتعاشی^{۱۰} برای آشکارسازی و تشخیص امضاهای طیفی و نیز رفتارهای طیفی اجزای بافت خاک در ایران با پارامترهای قابل قبول مدل تخمین-گر، اقدام نمودند. بر اساس اظهارات فوق، با توجه به اهمیت تخمین و ارزیابی اجزای بافت خاک، یافتن روش-های سریع، غیرپیچیده و کارآمد در مطالعه خاک، تبدیل به یک روند اصلی شده است. پژوهش حاضر قصد دارد به ارزیابی قابلیت کاربرد فن‌آوری طیف‌سنجی در

7- Partial Least Square Algorithm

8- Ratio of performance to deviation

9- Soil fractions modeling

10- Vibrational reflectance spectroscopy

1- Vibrational modes

2- Structural/active/functional groups and bonds

3- Multi-component analytical approach

4- Multi-collinearity errors

5- Highly dimensional spectral data

6- Vibrational spectroscopy technique

الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ترکیب اجزای بافت خاک هر نمونه توسط روش هیدرومتری، تعیین شد (کامارگو و همکاران ۲۰۰۹). سپس کلاس‌های بافتی خاک برای هر نمونه، بر اساس مثلث بافت خاک تعیین شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

طیف‌سنجی نمونه‌های خاک

عملیات نمونه‌برداری طیفی^۱ در اتاق تاریک استاندارد^۲، بدون وجود هرگونه نور مزاحم و با استفاده از دستگاه طیفی پیشرفته ASD-FieldSpec III به انجام رسید. مقادیر بازتابش مطلق^۳ (AR) نمونه‌های خاک در دامنه طیفی ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، با قدرت تفکیک طیفی (SR) حدود ۱ نانومتر، ثبت و جمع‌آوری شد. این امر منجر به تولید ۲۱۵۱ نقطه داده طیفی^۴ به ازای هر نمونه خاک شد. همچنین، برای عملیات نمونه‌برداری طیفی هر نمونه، حدود ۱۰ گرم خاک خشک شده، مورد استفاده قرار گرفت. طیف‌های بازتابش شده سطح خاک، با استفاده از کابل فیبر نوری^۵ با میدان دید (FOV) ۲۵ درجه بدون کلاهک، اسکن شدند. عملیات طیف‌سنجی به ازای هر ۲۰ دقیقه، توسط صفحه مرجع سفید استاندارد^۶ بنام اسپکترالون (Spectralon)، نرمال و بهینه‌سازی شد. روی-هم‌رفته، از یک آرایش استاندارد طیف‌سنجی، برای همه آزمایشات طیفی بهره برده شد که شامل: فاصله ۱۰ سانتیمتر بین سنجنده فیبر نوری و سطح خاک، و نیز لامپ هلوژن با قدرت ۱۵۰ وات، بعنوان منبع نوری در آزمایشگاه طیفی، بوده است.

عملیات پیش‌پردازش و تحلیل طیفی

فرآیند تبدیل و پیش‌پردازش‌های طیفی^۷ با هدف کاهش و یا حذف آثار و عوامل مزاحم و نیز بهبود کیفیت طیف‌های جمع‌آوری شده، انجام شد. برای این منظور، پس از بازبینی اولیه و تخصصی طیف‌های جمع‌آوری شده،

تشخیص اجزای بافت خاک در شرق استان مازندران، پردازد. از این نظر، اهداف تحقیق حاضر به قرار زیر هستند: ۱) مطالعه و بررسی امکان کاربرد فن‌آوری طیف‌سنجی در تعیین و تخمین اجزای بافت خاک در منطقه مورد مطالعه و ۲) ارزیابی دقت و قدرت شیوه تحلیل شیمیایی‌سنجی (الگوریتم کمومتری) با استفاده از طیف‌های بازتابش شده از سطح خاک.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بطور کلی، ۱۱۳ نمونه مرکب از ۰ الی ۱۵ سانتیمتری سطح خاک‌های شرق استان مازندران، جمع‌آوری شد. کاربری اراضی غالب، در این مناطق شامل اراضی جنگلی (طبیعی و مصنوعی)، اراضی زراعی و کشاورزی، باغ و اراضی شهری بوده است که بین شهرهای قائم‌شهر (۳۶/۶۸۴ شمالی، ۵۲/۸۶۳ شرقی) الی بهشهر (۳۶/۶۹۵ شمالی، ۵۳/۵۳۶ شرقی)، با مساحت تقریبی ۵۷۸۸ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۲۷- الی ۳۲+ از سطح دریای آزاد (AMSL) را شامل شده است. میانگین دمای سالیانه (MAT) منطقه حدود ۱۵ درجه سانتیگراد و میانگین بارش سالیانه (MAP) حدود ۷۸۹/۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین رژیم دمایی (STR) و رطوبتی خاک منطقه (SMR) بترتیب شامل زریک و ترمیک، می‌باشد (عمادی و همکاران ۲۰۲۰). نمونه‌های خاک با توزیع تصادفی در منطقه، انتخاب و جمع‌آوری شدند. توزیع و موقعیت مکانی نمونه‌های جمع‌آوری شده در شرق استان مازندران، در شکل ۱ نشان داده شده است.

تجزیه‌های آزمایشگاهی

در آزمایشگاه خاکشناسی، نمونه‌های هوا خشک شده، خرد شده و کلوخه‌های احتمالی پودر شدند و سپس از

^۵- Fiber-optic cable

^۶- the standard white reference panel

^۷- Spectral conversions and preprocessing

^۱- Spectral sampling

^۲- Standard dark room

^۳- the absolute reflectance

^۴- Spectral data point

نتایج و بحث

خصوصیات آماری اجزای بافت خاک در منطقه

بر اساس جدول آماره‌های توصیفی (جدول ۱) مختص اجزای بافت خاک نقاط نمونه برداری شده در شرق استان مازندران، بخش شن دارای میانگین $37/3$ درصد، دامنه تغییر $80/7$ درصد و نیز ضریب تغییرات (CV) $60/2$ درصد بوده است. همچنین برای بخش رس خاک این مقادیر به ترتیب شامل $23/6$ درصد، $57/3$ درصد و نیز $67/2$ درصد بوده است. برای بخش سیلت منطقه نیز به ترتیب $39/1$ درصد، $53/3$ درصد و نیز $33/4$ درصد بوده است (جدول ۱).

عملیات مدل سازی اجزای بافت خاک منطقه

در ابتدا، مجموع نمونه‌ها به طور تصادفی به دو قسمت شامل: ۹۱ نمونه برای تشکیل مدل هر یک از اجزای بافت منطقه و ۲۲ نمونه برای ارزیابی و صحت سنجی نهایی مدل تقسیم شد. همچنین از آزمون‌های تشابه بین دو گروه همچون کولموگروف-اسمیرنوف (KS)، استیودنت تی تست (Student T) و لون تست (Leven's test) به ترتیب برای تأیید مشابهت ویژگی‌های نرمال بودن، میانگین و واریانس بین دو گروه، استفاده شد. از رویکرد پیشرفته FLOOCV برای عملیات واسنجی مدل هر یک از اجزاء، بهره برده شد تا براساس آن بهترین و مطلوب ترین تعداد بردارهای پنهان^۹ (LVs) (متغیرهای پنهان^{۱۰} (LVs/LFs)) برای هر مدل، مشخص و استخراج شود. از طرفی، استفاده از شیوه بیان شده، می تواند تا حد زیادی خطای مرتبط با ضریب تغییرات بالای هر جزء را تعدیل کرده و نیز، خطای ناشی از چند-همخطی^{۱۱} و خود-همبستگی^{۱۲}

عملیات شامل: میانگین گیری طیفی^۱، هموارسازی^۲ و مشتق گیری اول و دوم^۳ بر روی طیف مختص هر نمونه، انجام شد. بر این اساس، طیف های خام خاک (شکل ۳-الف) به ازای هر ۱۰ نانومتر دامنه طیفی، میانگین گیری شده و مجدداً نمونه برداری طیفی^۴ انجام شد (شکل ۳-ب) و تعداد پارامترهای مستقل آن به ۲۱۶ نقطه داده طیفی رسید. همچنین تبدیلات طیفی همچون هموارسازی با فیلتر ساویتسکی گولای (SGF) (شکل ۳-ج)، مشتقات اول و دوم طیفی (شکل ۳-د، ن) و نیز عملیات تبدیل مرکزیابی طیفی^۵ (شکل ۳-و)، بر روی طیف های خام بازتابش شده نمونه ها، انجام شد. به علاوه، از الگوریتم FCV^۶ در طی عملیات طیف سنجی، برای انتخاب بهترین پیش پردازش و تبدیل طیفی، استفاده شد (کاسا و همکاران ۲۰۱۳).

رویکرد آماری-طیفی^۷

با هدف استخراج اطلاعات خاک ها از طیف های بازتابش-شده از سطح آن ها، روش ها و رویکردهای شیمیایی-سنجی^۸ متنوعی وجود دارد. تمامی این شیوه ها با هدف ایجاد روابط و همبستگی بین طیف های منعکس شده و خصوصیات مورد بررسی خاک، برنامه نویسی و ایجاد شده اند (هنگ و همکاران ۲۰۱۹). الگوریتم رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، که در تحقیق حاضر نیز انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته است، یکی از بهترین و متداول ترین آن ها است که به طور مبسوط و در بسیاری از زمینه ها مورد استفاده قرار می گیرد (ژائو و همکاران ۲۰۲۰). این الگوریتم، به دلیل شیوه عمل بسیار قدرتمند و بهره گیری از دو تکنیک محاسباتی MLR و PCR باهم دیگر، سبب ایجاد نتایج دقیق تر و مناسب تر، برای پهنه وسیعی از انواع خاک ها می گردد.

7- Spectral-statistical approach

8- chemometric approaches

9- Latent Vectors

10- Latent Variables/Factors

11- Multi-collinearity drawbacks

12- Autocorrelation-interconnection drawbacks

1- Spectral averaging

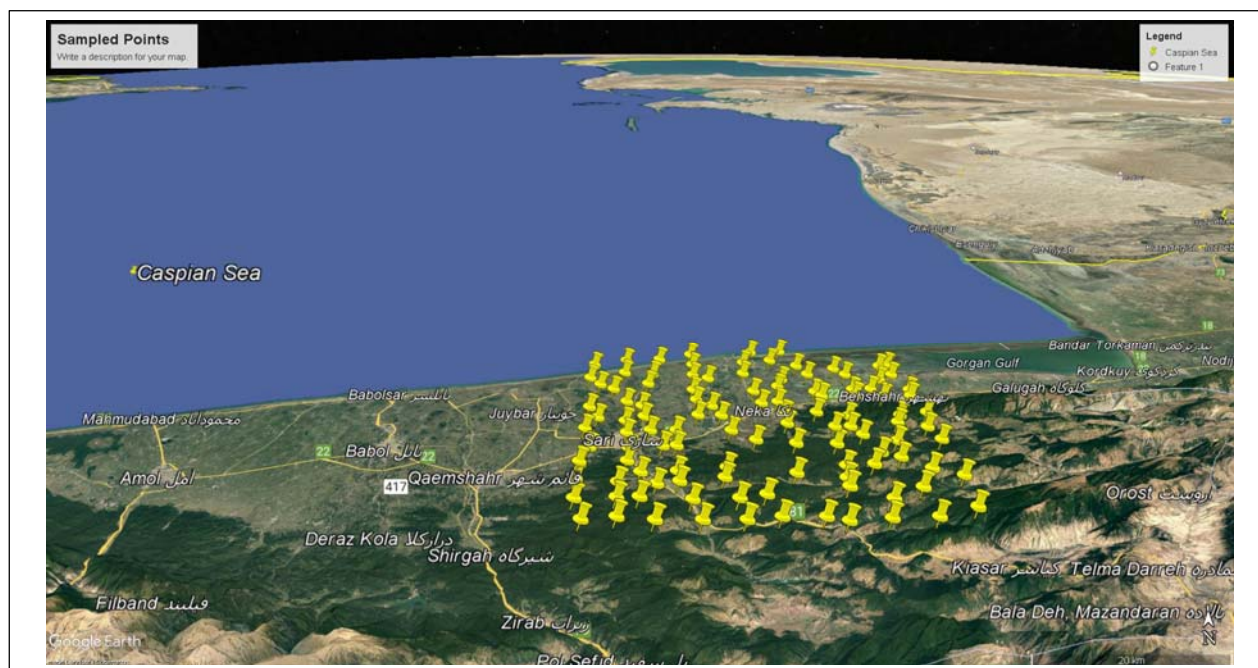
2- Smoothing

3- Derivations (1st & 2nd)

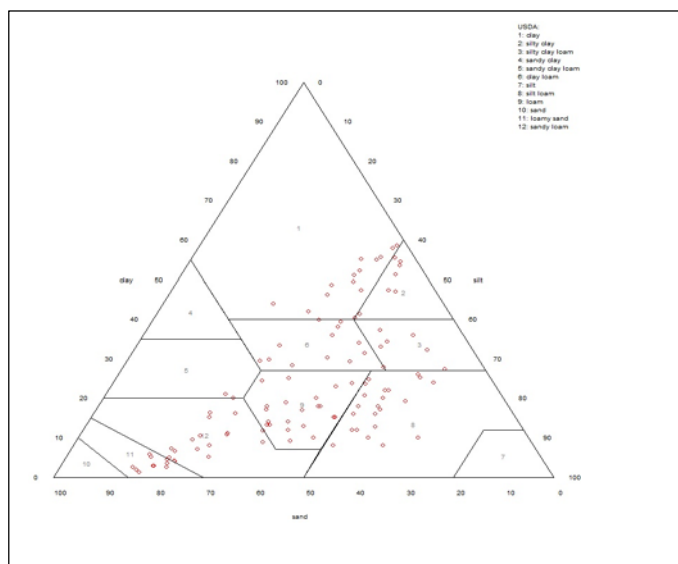
4- Optical resampling

5- Mean-centering conversion

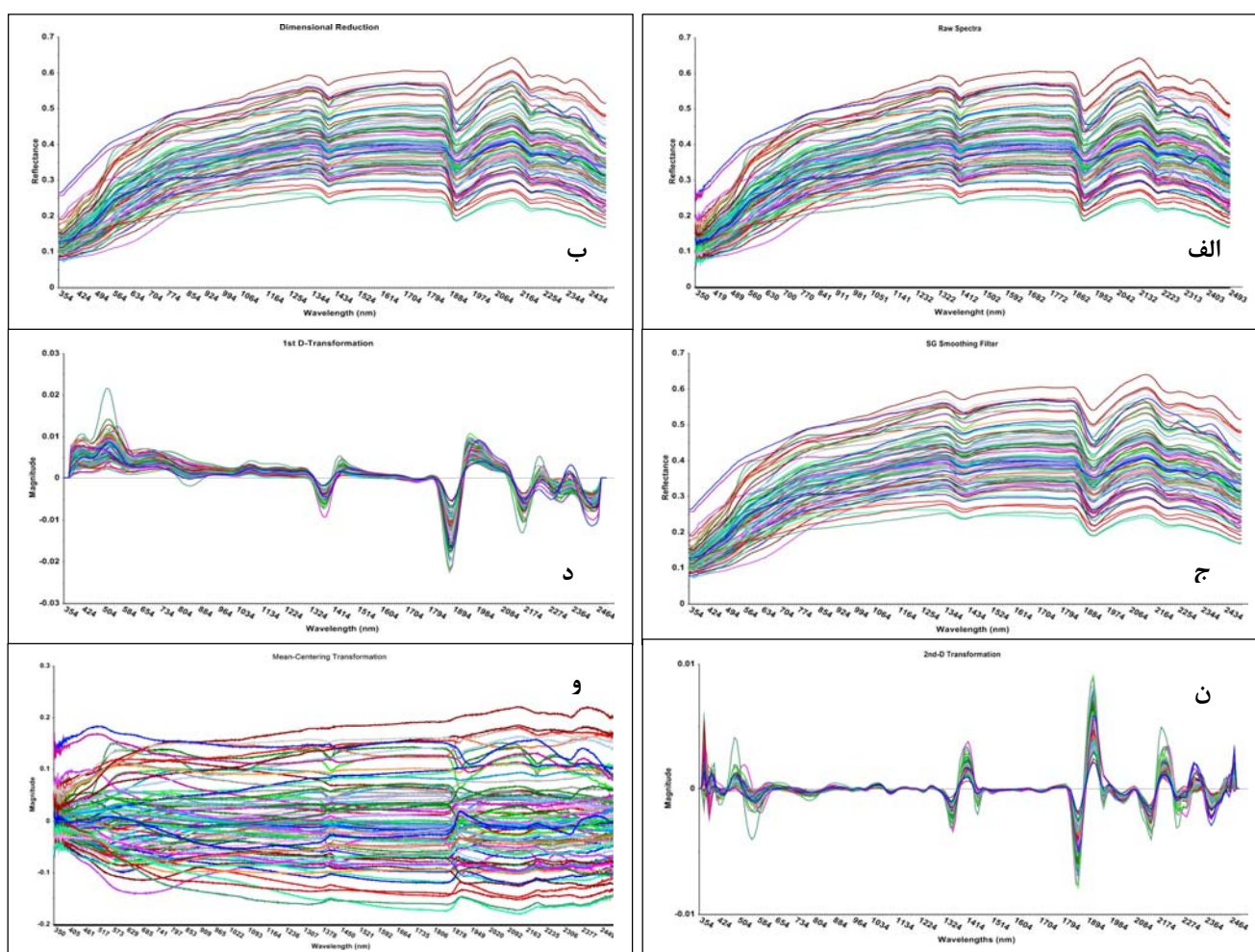
6- Full Cross Validation tech.



شکل ۱- موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری شده در شرق استان مازندران



شکل ۲- کلاس‌های بافت خاک نقاط نمونه‌برداری شده در شرق استان مازندران



شکل ۳- عملیات پیش‌پردازش و تبدیلات طیفی: الف) طیف‌های خام خاک، ب) طیف‌های میانگین‌گیری شده، ج) هموارسازی شده با فیلتر SG، د) تبدیل شده بر اساس الگوریتم مشتق اول، ن) تبدیل شده بر اساس مشتق دوم، و) تبدیل شده بر اساس عملیات مرکزگیری طیفی.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی اجزای بافت خاک در منطقه مورد مطالعه

متغیر	Min	Max	Skewness	Kurtosis	Mean	Median	SD	Range	CV%
شن	۲	۸۲/۷	۰/۴۵	-۰/۸۳	۳۷/۲۶	۳۲	۲۲/۴۴	۸۰/۷	۶۰/۲
رس	۱/۲	۵۸/۵	۰/۶۵	-۰/۶۴	۲۳/۶	۱۹/۲	۱۵/۸۷	۵۷/۳۰	۶۷/۲
سیلت	۱۴/۷	۶۸	۰/۰۵۳	-۰/۸۵	۳۹/۱۳	۳۹	۱۳/۰۷	۵۳/۳۰	۳۳/۴

از ۹۸ درصد اطلاعات طیفی و بیش از ۷۴ درصد اطلاعات خاک را بطور مجزا، در خود جمع‌آوری و متمرکز کنند (شکل ۴-الف). بر این اساس، فرآیند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بطور خودکار، بر مبنای ۷ مؤلفه پنهان انجام شد. شیوه FLOOCV بهترین تعداد بردار (فاکتور) پنهان (PCs/LFs) را برای هر جزء بافتی خاک منطقه،

بین متغیرهای مستقل و وابسته را حذف کند (گو و همکاران ۲۰۱۹). در گام بعدی، عملیات امتیازدهی^۱ بعنوان یکی از مهمترین مراحل مدل‌سازی، برای متمرکزسازی واریانس متغیرهای تخمین‌گر و پاسخ و همچنین، کاهش شباهت و همپوشانی بین آن‌ها، انجام شد. بنابر این گام، دو بردار (متغیر) پنهان اول ($LF/LV=2$)، توانستند بیش

^۱- Scoring calculating process

محاسبه کرده و تشخیص داد. غالباً از این شیوه پیشرفته^۱ تحلیلی برای پرهیز از بیش- و یا کم‌برآورد^۱ متغیرهای پاسخ، استفاده می‌شود (لو و همکاران ۲۰۱۳). بدین ترتیب، بهترین تعداد مؤلفه (بردار) پنهان برای هر جزء بافت خاک، بر مبنای ضریب تبیین (R^2_{cv})، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE_{cv}$) و نیز ضریب همبستگی (R_{cv}) محاسبه شد که شامل: ۶ بردار پنهان برای جزء شن، ۷ بردار پنهان برای جزء رس و در نهایت ۶ بردار پنهان برای جزء سیلت در شرق استان مازندران، بوده است (شکل ۴-الف تا ۴-ذ). آزمون‌های T^2 Hotelling و نیز لوریج تعدیل‌شده ($Adjusted\ Leverage$)، مشارکت بیش از ۹۲ درصدی نمونه‌های طیفی و خاک را مشترکاً، برای ساختن مدل نهایی هر بخش بافت، نشان داند (شکل ۴-ث). مقدار لوریج به طور اتوماتیک تعیین شده و سپس ناهمگونی و عدم‌تجانس داده‌های طیفی جمع‌آوری شده، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت (شکل ۴-ض، ط). باندهای طیفی و طول‌موج‌های مفید و مؤثر و نیز دامنه-های طیفی، بر مبنای آزمون‌هایی شامل تحلیل وزنی طیفی و ضرایب بتا^۲ و همچنین آزمون عدم قطعیت مارتن^۳، آشکارسازی و مشخص گردید (شکل ۴-ر، ز، ژ، س، ش، ص). بر این اساس، بهترین طول‌موج‌های مؤثر و سهم در فرآیند تخمین اجزای بافت خاک منطقه، به خوبی آشکارسازی شدند. دامنه‌های طیفی بازتابی شامل مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه، بعنوان مؤثرترین دامنه‌ها به لحاظ دارا بودن بیشترین علائم طیفی جهت تشخیص اجزای بافت خاک در منطقه شرق استان مازندران، تشخیص داده شدند (شکل ۴-ر، ز، ژ، س، ش، ص). گام بعدی، به فرآیند مدل‌سازی روابط واسنجی شده نهایی بین اجزاء (بردارها و مؤلفه‌های پنهان) و داده‌های طیفی بازتابی، اختصاص داده شد (شکل ۴-الف، ب، پ). همچنین در این گام، به‌طور هم‌زمان،

با بررسی مقادیر باقیمانده مربوط به داده‌های خاک و داده‌های طیفی با کمک تست تأثیر (IFT)، مؤثر بودن هر یک از مدل‌ها، مشخص گردید و ثابت شد. مدل تخمین‌گر نهایی برای هر یک از اجزاء بافت خاک منطقه، با استفاده از الگوریتم پیشرفته PLS به‌همراه شیوه تحلیلی FLOOCV با مشخصات زیر، واسنجی گردید، برای جزء شن: ضریب همبستگی (R_c): ۰/۹۴، ضریب تبیین/رگرسیون (R^2_c): ۰/۸۹، میانگین مربعات خطا ($RMSE_c$): ۷/۴۲ و خطای استاندارد مدل (SEC): ۷/۴۶؛ برای جزء رس: ضریب همبستگی (R_c): ۰/۹۰، ضریب تبیین/رگرسیون (R^2_c): ۰/۸۲، میانگین مربعات خطا ($RMSE_c$): ۶/۸۸ و خطای استاندارد مدل (SEC): ۶/۹۲؛ نهایتاً برای جزء سیلت: ضریب همبستگی (R_c): ۰/۶۲، ضریب تبیین/رگرسیون (R^2_c): ۰/۳۹، میانگین مربعات خطا ($RMSE_c$): ۱۰/۲۱ و خطای استاندارد مدل (SEC): ۱۰/۲۷. همان‌گونه که پیش‌تر نیز بدان اشاره شده است، مدل‌های اجزاء بافت خاک واسنجی شده نهایی^۴ برای بخش شن و سیلت بر مبنای شش مؤلفه پنهان ($LFs/LVs=6$) و برای بخش رس بر اساس هفت مؤلفه پنهان ($LFs/LVs=7$)، بنا شده است. به‌علاوه، تمامی مشخصات و جزئیات مرتبط با هر مدل جزء بافت خاک، در کادر شکل ۴-الف، ب، پ، نشان داده شده است. دقت و کیفیت مدل‌های واسنجی شده، با استفاده از شاخص-های صحت و درستی مدل^۵ شامل RPD و RPIQ (چانگ و لارید ۲۰۰۲؛ بلون ماورل و همکاران ۲۰۱۰)، محاسبه شدند. بر مبنای دو شاخص فوق‌الذکر، کارایی و کیفیت مدل‌های واسنجی شده نهایی محاسبه شدند. بدین ترتیب، برای بخش شن بترتیب: ۳/۰۸ و ۴/۸۱، برای جزء رس بترتیب: ۲/۳۶ و ۳/۴۶، و برای بخش سیلت بترتیب: ۱/۲۹ و ۲ محاسبه شدند که بر این اساس، مدل‌های اجزاء شن و رس تا حد زیادی در تطابق با استانداردها و مطالعات

^۴- Finalized calibrated

^۵- Model accuracy indicants

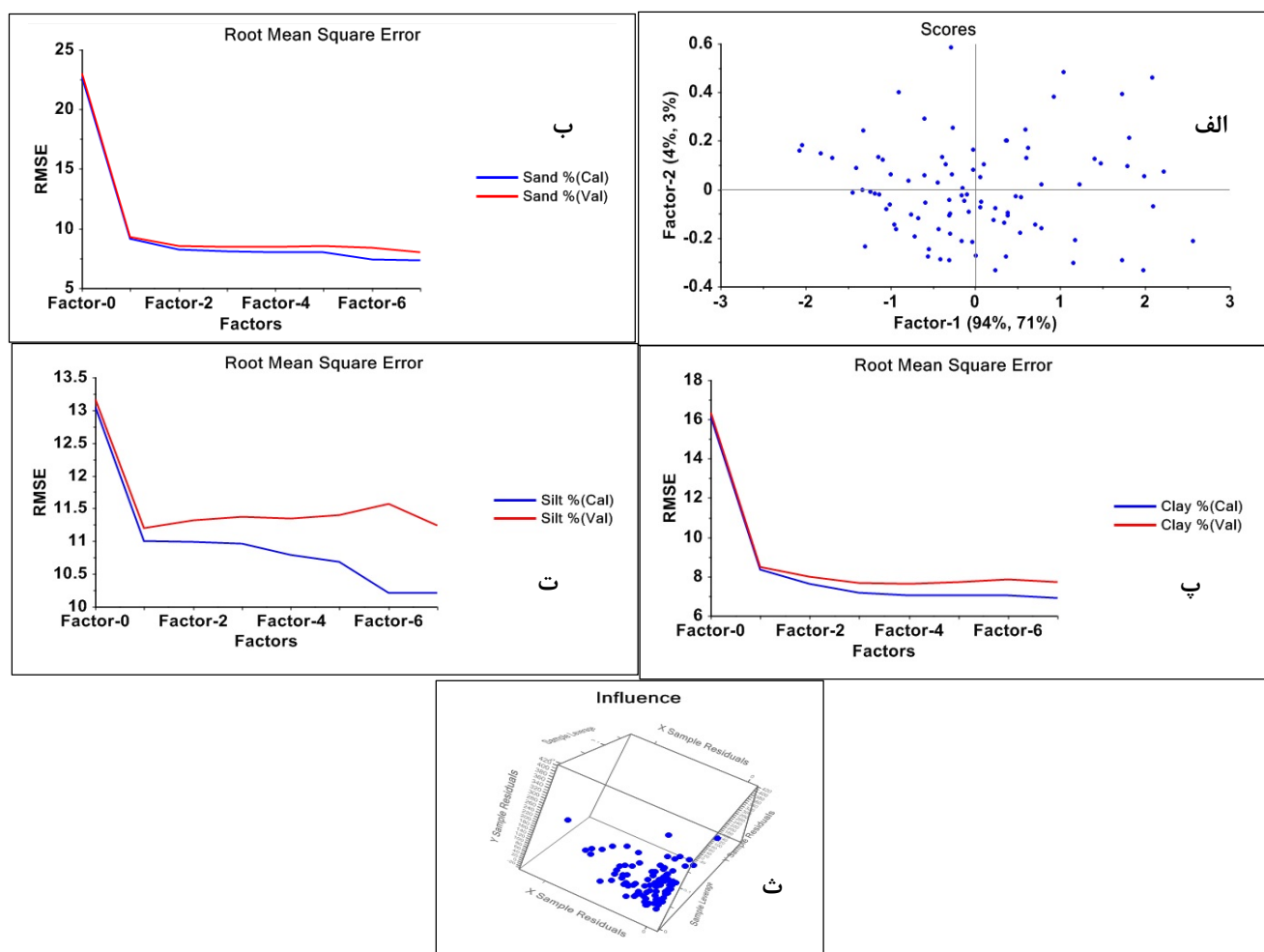
^۱- Under- or over-prediction

^۲- Beta & spectral weight analyses

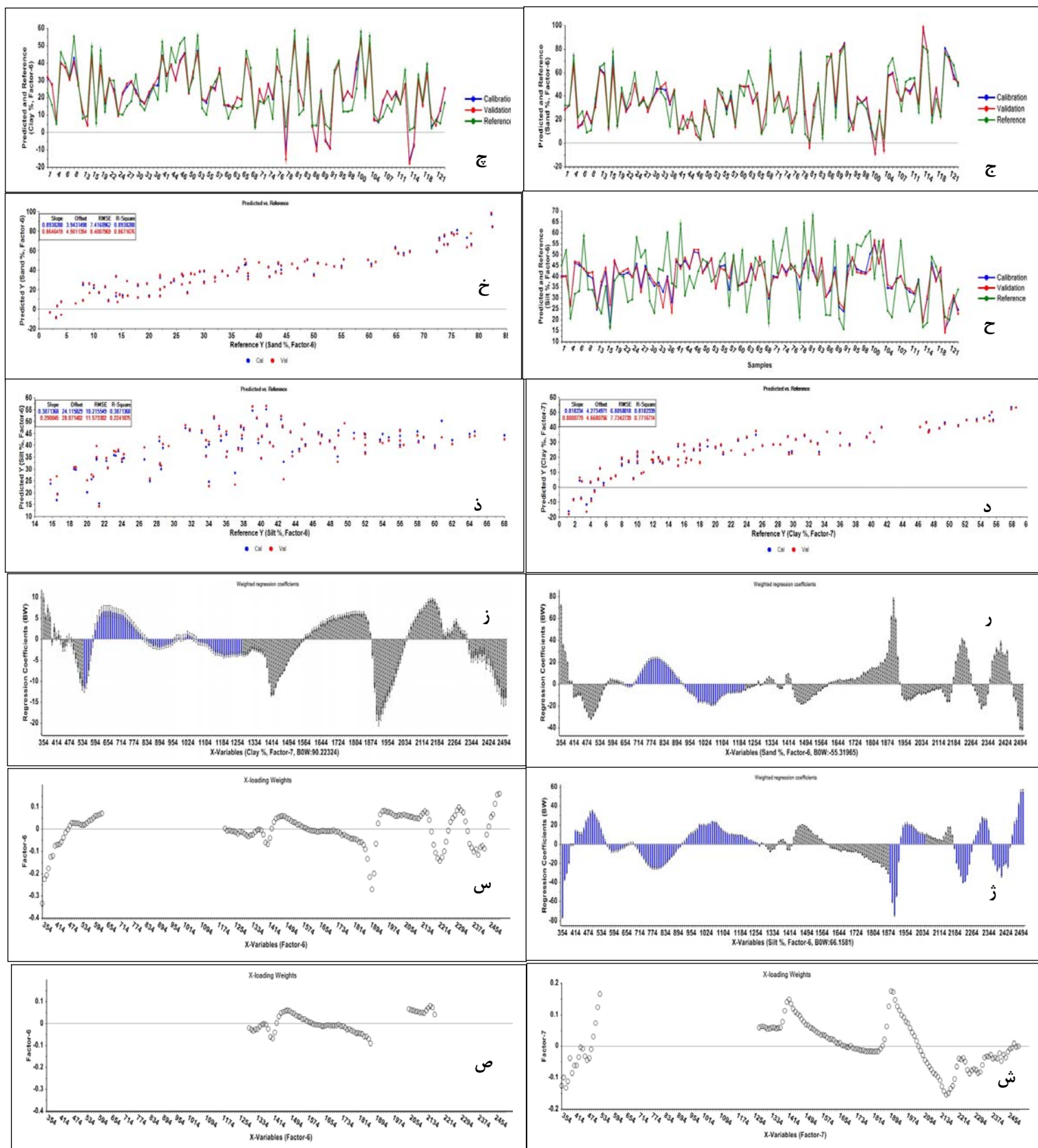
^۳- Marten's uncertainty tests

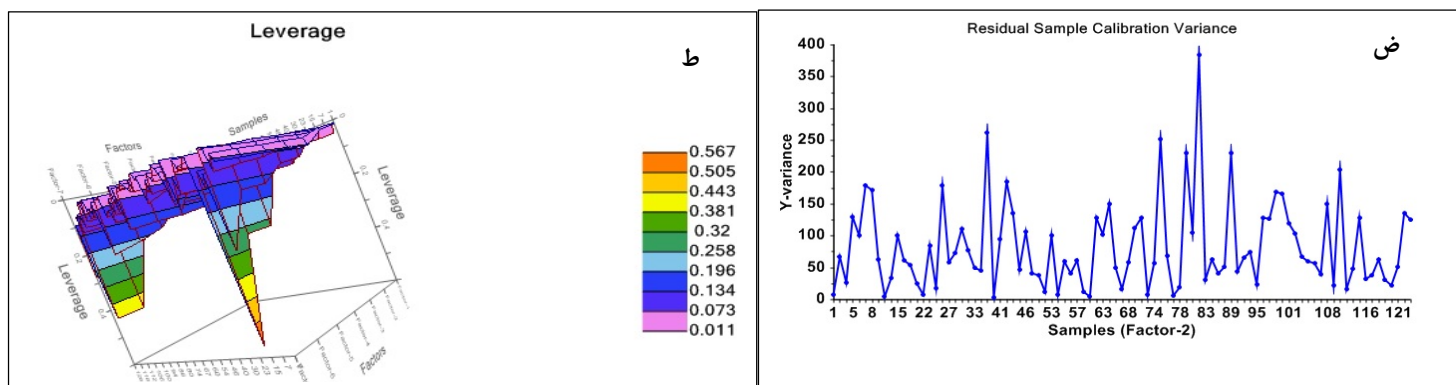
انجام شده بوده‌اند، ولی برای جزء سیلت، این مقادیر تا حدی کمتر بوده است. همچنین، بیشینه همبستگی‌های بین اجزای بافت خاک و دامنه‌های طیفی مؤثر، با بهره‌گیری از شیوه تجزیه چند جزئی^۱، محاسبه شدند (شکل ۴- ر، ژ، س، ش، ص). نتایج آن در ادامه آمده است، برای جزء شن: دامنه مرئی - ۶۱۰ نانومتر (۰/۷۵)، دامنه مادون قرمز نزدیک - ۹۷۰ نانومتر (۰/۸۱) و مادون قرمز موج- کوتاه - ۲۲۰۰ نانومتر (۰/۹۲)؛ برای اجزاء رسی: دامنه مرئی - ۵۵۰ نانومتر (۰/۶۳)، دامنه مادون قرمز نزدیک - ۹۵۰ نانومتر (۰/۸۰) و مادون قرمز موج کوتاه - ۲۰۰۰ الی ۲۴۰۰ نانومتر (۰/۸۸ الی ۰/۸۹)؛ به همین ترتیب برای اجزاء سیلتی منطقه: دامنه مرئی - ۴۷۰ نانومتر (۰/۳۹)، دامنه مادون قرمز نزدیک - ۱۰۴۰ نانومتر (۰/۵۰) و

دامنه مادون قرمز موج کوتاه - ۱۹۱۰ الی ۲۲۲۰ نانومتر (۰/۵۱ الی ۰/۵۳) محاسبه شدند (شکل ۴- ر، ژ، س، ش، ص). در نتیجه، محدوده‌ها و باندهای طیفی مشخص شده به‌عنوان مؤثرترین اجزاء طیفی منطقه با بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی، بیان‌گر اثرات بسیار بارز و قوی طیف‌های بازتابش شده در فرآیند مدل‌سازی اجزای بافت خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده، می‌توان این‌گونه بیان کرد که بدون شک، در پژوهش حاضر، طیف‌های ارتعاشی بازتاب شده از سطح خاک‌های منطقه، حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی از اجزاء تشکیل دهنده خاک‌های استان مازندران می‌باشد.

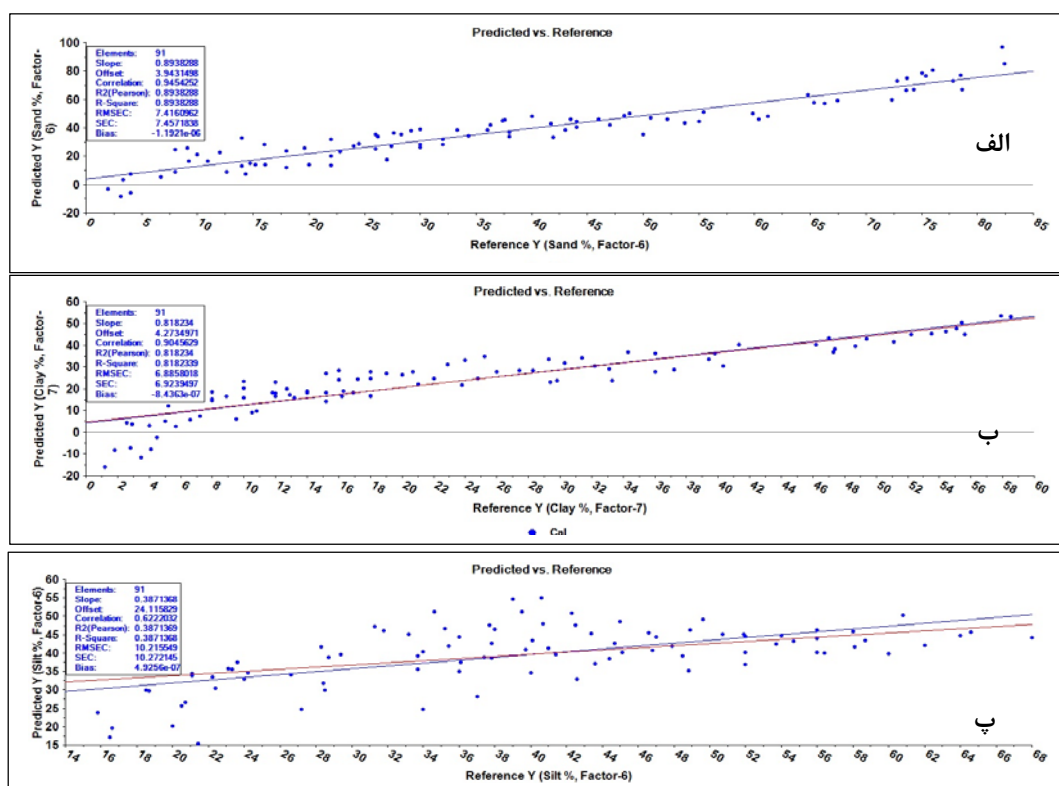


۱- Multi-components analytical approach





شکل ۴- خروجی‌های الگوریتم PLSR، به‌طور مختصر: الف) تحلیل مؤلفه‌های اصلی (فرآیند امتیازدهی) بر مبنای اجزای خاک و داده‌های طیفی؛ ب، پ، ت) شیوه انتخاب خودکار LFs/LVs با استفاده از FLOOCV بر مبنای تحلیل میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌ترتیب: برای اجزای شن، رس و سیلت؛ ث) آزمون تأثیر (IfT) بر مبنای باقیمانده‌ها و لوریج برای اثبات تأثیرگذار بودن متغیرهای تخمین‌گر و پاسخ؛ ج، ح) مقادیر تخمین‌زده شده نسبت به مقادیر مرجع آزمایشگاهی به‌ترتیب برای اجزای: شن، رس و سیلت، بر اساس تعیین LFs با شیوه پیشرفته FLOOCV در زیرمجموعه واسنجی؛ خ، د، ذ) اجزای تخمین‌زده شده در قیاس با بررسی مقادیر مرجع، به‌ترتیب برای اجزای: شن، رس و سیلت؛ ر، ز، ژ) به‌ترتیب: نتایج آزمون عدم قطعیت مارتن (Marten's uncertainty test)، تحلیل ضرایب وزنی بتا (Weighted beta coefficients) و تحلیل ضرایب رگرسیون (Regression Coefficient Analysis) (بتای ساده) برای آشکارسازی و تعیین بارزترین و مؤثرترین دامنه‌های طیفی، باندهای طیفی و طول‌موج‌های با تأثیر صفر (Zero-effects wavelengths) برای اجزای: شن، رس و سیلت؛ س، ش، ص) تشخیص طول‌موج‌های مؤثر و پرنفوذ بر مبنای تحلیل بار وزنی متغیرهای تخمین‌گر (X-loading weight analysis) برای اجزای: شن، رس و سیلت؛ ض) واریانس باقیمانده‌های واسنجی بر اساس داده‌های متغیرهای پاسخ؛ ط) مقادیر لوریج نهایی (Final Leverage) بر طبق تعداد LFs و نمونه‌ها در فرآیند مدل‌سازی.



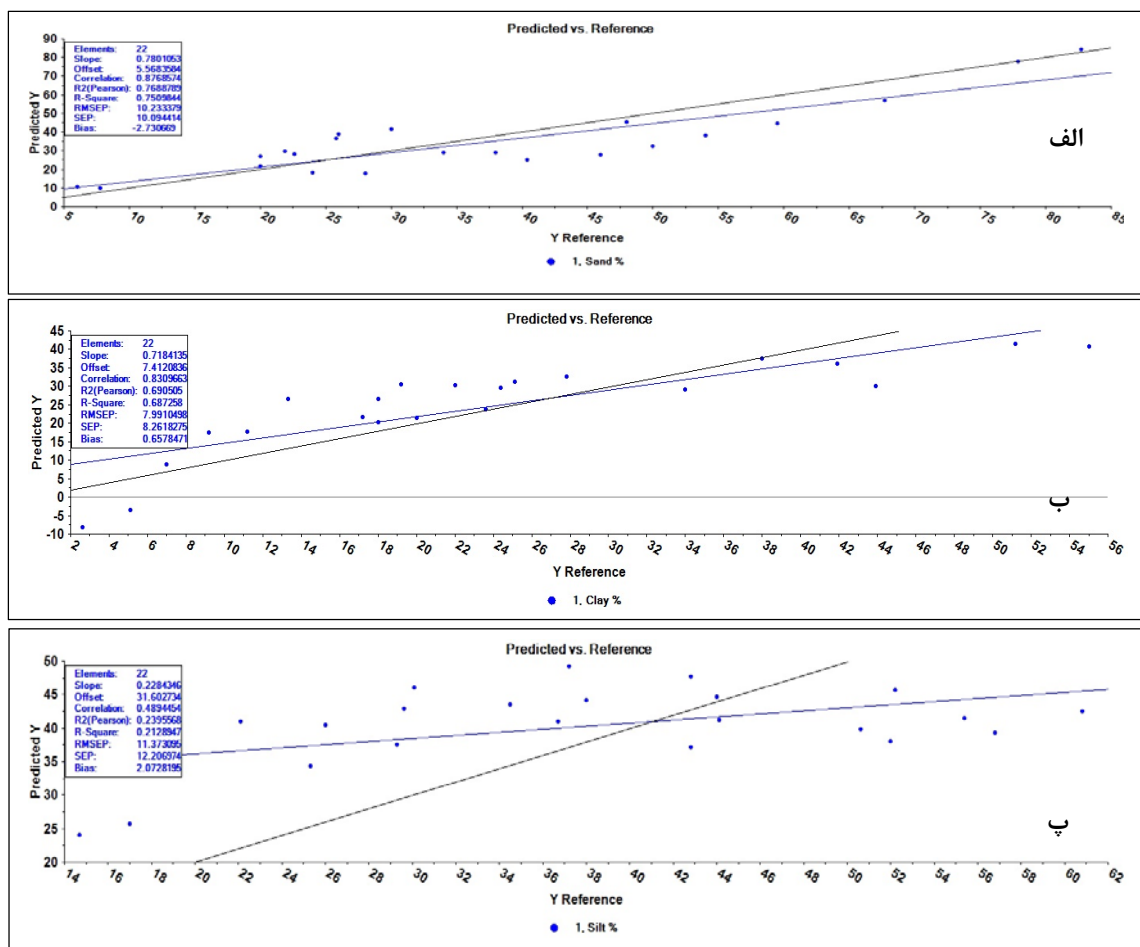
شکل ۵- الف، ب، پ) خروجی مدل‌های نهایی توصیفی^۱ به‌همراه پارامترهای مربوطه هر مدل، بر مبنای تعداد مشخص شده LF/LV به‌ترتیب برای اجزای: شن، رس و سیلت.

^۱- Fully described finalized model outputs

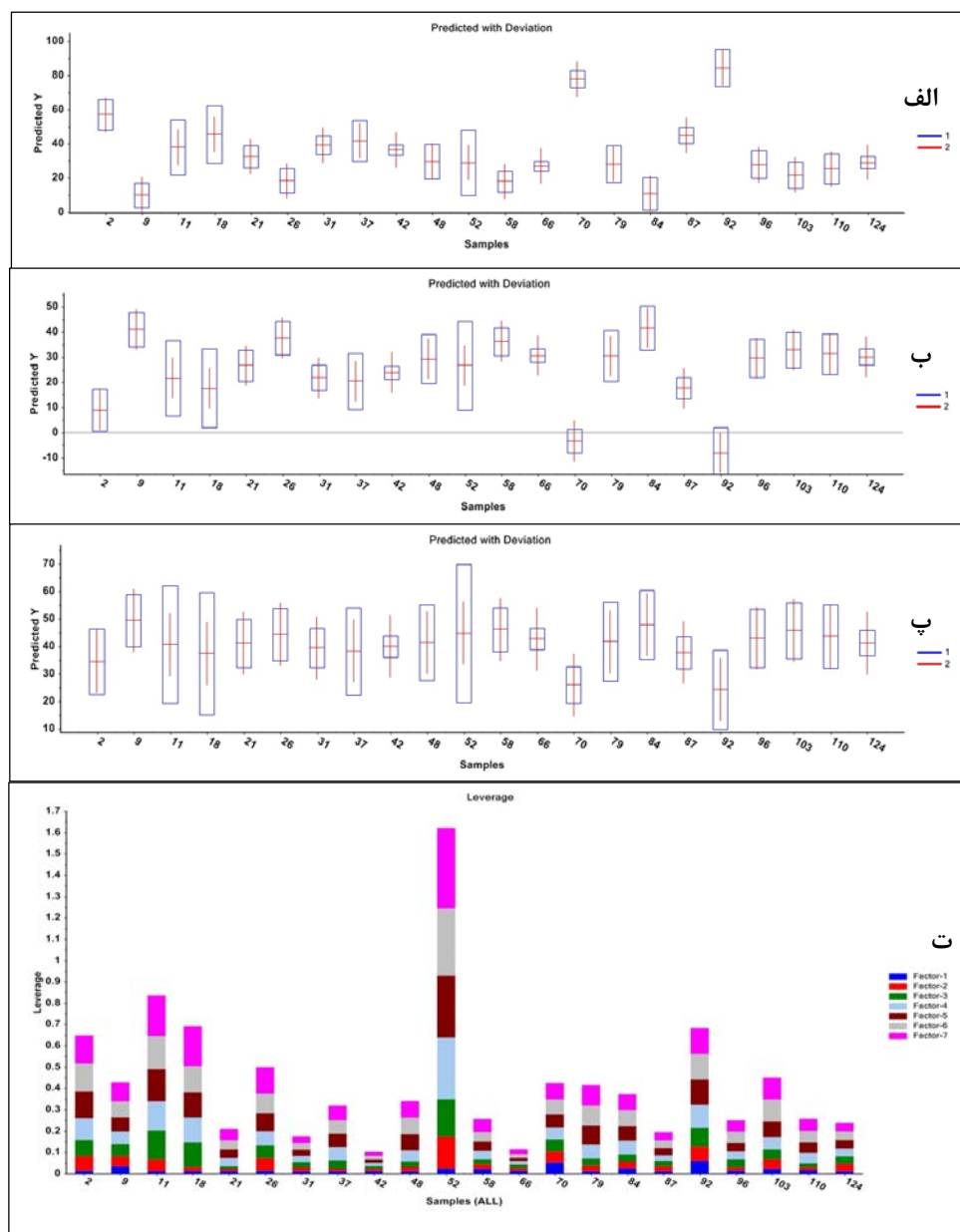
ارزیابی دقت و صحت مدل

مرحله صحت‌سنجی و ارزیابی کیفیت و قابلیت پیش‌بینی مدل‌های واسنجی شده، با استفاده از ۲۲ نمونه مجزای خاک، که وارد فرآیند مدل‌سازی نشدند، به انجام رسید. برای این منظور، از مدل‌های واسنجی شده نهایی مربوط به هر یک از اجزای بافت خاک از مرحله قبل، برای تخمین و برآورد مقادیر همان جزء بافتی، در زیرگروه نمونه‌های اعتبارسنجی، استفاده گردید. بر این اساس، در این گام، مدل‌های محاسبه شده برای اجزای شن، رس و سیلت منطقه، به‌ترتیب: بر مبنای شن، هفت و شش متغیر پنهان (PCs/LVs)، مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. اجزای پیش‌بینی شده خاک با استفاده از این مرحله، با مقادیر اصلی تعیین شده هر جزء بافتی در آزمایشگاه

خاکشناسی (مقادیر رفرنس)، مقایسه شد (در زیرگروه نمونه‌های مستقل) (شکل ۶- الف، ب، پ). سپس، دقت و صحت هر یک از مدل‌های واسنجی شده، ارزیابی گردید (شکل ۷- الف، ب، پ، ت). به‌لحاظ علمی، مدل‌های ساده‌تر بر مبنای تعداد کمتری از متغیرهای پنهان بوده (LFs/LVs/PCs)، که در اولویت انتخاب مدل در فرآیند مدل‌سازی هستند (شکل‌های ۶ و ۷). بنابراین، در گام اعتبارسنجی، مدل‌ها به نوعی مدیریت می‌شود که بهترین و در عین حال، کمترین تعداد بردارهای پنهان مرتبط با هر جزء بافتی را به خود اختصاص دهند (دانش و بهرامی ۲۰۲۲).



شکل ۶- صحت‌سنجی و ارزیابی دقت مدل‌ها بر مبنای نمونه‌های مستقل برای اجزاء بافتی خاک، شامل: الف) شن، ب) رس و پ) سیلت. (تمامی روابط مدل شده، بر اساس شیوه الگوریتم پیش‌رفته PLS-FLOOCV می‌باشد).



شکل ۷- مقادیر تخمین زده شده به همراه خطای آن‌ها به ازای هر نمونه (مستقل)، در گام صحت‌سنجی برای: الف) شن، ب) رس، پ) سیلت؛ ت) آزمون و بررسی مقادیر لوریج به ازای تعداد متغیر پنهان (LF) در نمونه‌های اعتبارسنجی.

ضریب همبستگی $(R_p) = 0.83$ ، ضریب رگرسیون (R^2_p) = 0.69 ، میانگین مربعات خطا $(RMSE_p) = 7.99$ و خطای استاندارد $(SE_p) = 8.26$. نهایتاً مدل جزء سیلت بدین شکل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت: ضریب همبستگی $(R_p) = 0.49$ ، ضریب رگرسیون $(R^2_p) = 0.24$ ، میانگین مربعات خطا $(RMSE_p) = 11.37$ و خطای استاندارد $(SE_p) = 12.20$. علاوه بر آن، به‌طور نموداری، فرآیند

شکل‌های ۶ و ۷، نشان دهنده مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر مرجع برای هر یک از اجزای بافت خاک، با استفاده از مدل‌های نهایی شده می‌باشند. بنابراین، مدل نهایی شن با این مشخصات ارزیابی و صحت‌سنجی شد: ضریب همبستگی $(R_p) = 0.88$ ، ضریب رگرسیون (R^2_p) = 0.77 ، میانگین مربعات خطا $(RMSE_p) = 10.23$ و خطای استاندارد $(SE_p) = 10.09$. مدل نهایی رس نیز با این مشخصات مورد تأیید و ارزیابی قرار گرفت:

تخمین به همراه مقادیر انحراف^۱ (خطا) در زیرگروه اعتبارسنجی، در شکل ۷- الف، ب، پ، ت نشان داده شده است. شکل ۷- ت، بیانگر مقادیر لوریج بر مبنای تعداد مؤلفه‌های اصلی در نظر گرفته شده (PCs)، در مرحله ارزیابی مدل می‌باشد. به عنوان ارزیابی کلی، می‌توان بر اساس پروسه تخمین اجزای مورد بررسی خاک، انحرافات، خطاهای آن‌ها و نیز مقادیر لوریج مربوطه (شکل‌های ۶ و ۷)، این‌طور نتیجه گرفت که فرآیند کلی مدل‌سازی، بسیار خوب شکل گرفته و قطعاً نتایج آن قابل قبول بوده است. به طریق محاسباتی، کارایی و کیفیت مدل‌های بدست آمده، توسط دو فاکتور نشان دهنده قدرت مدل^۲ RPD و RPIQ مورد سنجش قرار گرفت. بنابراین در زیرگروه اعتبارسنجی، مدل‌ها، با مشخصات مقابل مورد سنجش کیفیت و صحت قرار گرفتند، برای جزء شن: $RPIQp = 2.79$, $RPDp = 2.05$; برای جزء سیلت: $RPIQp = 1.98$, $RPDp = 1.15$. بر اساس مقادیر RPD و RPIQ محاسبه شده، قدرت و قابلیت تخمین خصوصیات خاک می‌تواند به سه درجه (کلاس)، تقسیم شود. معمولاً اگر شاخص‌های نشانگر قدرت و کیفیت مدل (در زیرمجموعه واسنجی و یا اعتبارسنجی)، بیشتر از ۲ باشند، مدل در گروه درجه A قرار می‌گیرد که نشان دهنده تخمین بسیار عالی و دقیق خصوصیت مورد نظر خاک توسط مدل، می‌باشد. اگر شاخص محاسبه شده بین عدد ۱/۴ و ۲ قرار گیرد، مدل در گروه درجه B قرار می‌گیرد که بیانگر دقت و قدرت خوب و قابل قبول مدل در فرآیند تخمین و نیز کارایی آن است. در صورتی که شاخص (های) محاسبه شده کمتر از عدد ۱/۴ باشد، مدل در گروه درجه C قرار گرفته که بیانگر عدم کارایی و دقت لازم مدل برای تخمین خصوصیت مورد بررسی خاک، می‌باشد (چانگ و لارید ۲۰۰۲)، که از این نظر باید برای تقویت مدل و یا رفع خطاهای احتمالی (عدم قطعیت)، چاره‌ای اندیشید. بر اساس نتایج بدست آمده در مراحل

مدل‌سازی و اعتبارسنجی آن، مدل تخمین‌گر شن در زیرگروه واسنجی با شاخص‌های محاسباتی RPDc و RPIQc به ترتیب، ۳/۰۸ و ۴/۸۱، دارای توان بسیار بالایی در تخمین مقادیر شن شرق استان مازندران دارد و می‌توان به آن اعتماد کرد. همچنین این موضوع در زیرمجموعه اعتبارسنجی با نمونه‌های مستقل، نیز تأیید شده است که مقادیر شاخص محاسباتی مدل به ترتیب ۲/۰۵ و ۲/۷۹، بدست آمده است. همچنین گفتنی است که نتایج حاصل از مدل تخمین‌گر شن در تحقیق حاضر، در قیاس با نتایج حاصل از دانش و بهرامی (۲۰۲۲) و بهرامی و همکاران (۲۰۲۲)، دارای کارایی، کیفیت و قدرت برآورد بهتری بوده است. مدل تخمینی رس در مرحله واسنجی، با شاخص‌های محاسباتی RPDc و RPIQc به ترتیب ۲/۳۶ و ۳/۴۶، نشان داد که دارای توانایی بالایی در تخمین این جزء بافت خاک در شرق استان مازندران، بوده است. همچنین این امر، در گام اعتبارسنجی نیز با استفاده از شاخص‌های بدست آمده به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۷۸، نیز بیانگر توانایی بالا و قابل اعتماد بودن مدل رس در منطقه، به اثبات رسید. همچنین بر اساس پارامترهای مدل رس و شاخص‌های کیفیت آن، مدل حاضر دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از مدل رس بدست آمده توسط دانش و همکاران (۲۰۱۶)، در استان مازندران، عمل کرده است. اما برای جزء سیلت خاک منطقه، مدل مربوطه در هر دو گام واسنجی و ارزیابی، تا حدی ضعیف‌تر نسبت به دیگر اجزاء بافت خاک، عمل کرده است. به گونه‌ای که مقادیر شاخص RPDc و RPIQc در مرحله واسنجی مدل، به ترتیب ۱/۲۹ و ۲، بدست آمده است. به طور مشابه، برای گام اعتبارسنجی بر اساس نمونه‌های مجزا، این شاخص‌ها به ترتیب ۱/۱۵ و ۱/۹۸ محاسبه گردید که در قیاس با بخش‌های دیگر بافت منطقه، حاکی از ضعف مدل، ولی تاحدی قابل قبول بودن آن دارد. همچنین نتایج بدست آمده از مدل سیلت در تحقیق حاضر، تا حد زیادی با پژوهش صورت گرفته توسط دانش و همکاران (۲۰۲۲)،

²- Model robustness factor

¹- Deviation

$(RMSE_{cv}) = 12/19$ و RPD حدود $2/06$ ، که تا حدی از مدل شن حاضر، ضعیف‌تر عمل کرده است. از دلایل اصلی که مدل سیلت در بسیاری از مطالعات و نیز پژوهش حاضر نسبت به بقیه اجزاء، دارای کارایی کمتر بوده است، کمتر بودن ضریب تغییرات این جزء بافتی و نیز تغییرپذیری مکانی پایین آن و همچنین وجود اندکی کشیدگی^۲ در پارامتر مورد بررسی در خاک‌های منطقه، بوده است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر در مقایسه با روش‌های مرسوم و رایج آزمایشگاهی، بیان‌گر قابلیت کاربرد فن‌آوری طیف‌سنجی برای تخمین و مطالعه اجزای بافت خاک، با سرعت بیشتر، بهنگام، ارزان‌تر، قابل تکرار و غیر مخرب بوده است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از علائم و پدیده‌های طیفی تشخیصی (DAFs) در کل طیف بازتاب شده از نمونه‌ها، قادر به بررسی اجزای بافت بوده است. قطعاً، استفاده از شیوه پیشرفته الگوریتم شیمیایی‌سنجی (کمومتریک) در ادغام با فن‌آوری مرئی-مادون قرمز نزدیک (VNIR)، تحقیق حاضر را ممکن ساخته است. همچنین، عملیات پیش‌پردازش طیفی اصلی و رویکرد FLOOCV، منتج به افزایش دقت و کارایی مدل‌ها برای هر یک از اجزای مورد بررسی خاک، گردیده است. به-علاوه، با استفاده از شاخص‌های دقت و کیفیت^۳ در پروسه مدل‌سازی، نشان داده شد که کارایی و عملکرد مدل‌های ساخته شده برای هر یک از اجزاء، تا حد زیادی از مطالعات مشابه، بالاتر و بهتر بوده است. بر این اساس می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های ساخته شده برای هر یک از اجزای شن و رس در خاک‌های شرق استان مازندران، بسیار مطلوب بوده و با اطمینان بسیار بالایی می‌توان از آن‌ها بهره جست. ولی برای جزء سیلت، عملکرد مدل تا حدی ضعیف‌تر بوده است که غالباً این

مطابقت دارد. به‌علاوه، پنگ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی و مطالعه اجزای بافت خاک در چین با بهره‌گیری از فن-آوری طیف‌سنجی و الگوریتم پیشرفته PLS، اقدام کردند. ایشان توانستند جزء شن را با ضریب رگرسیون (R^2) حدود $0/77$ ، جزء رس با ضریب رگرسیون $0/65$ و همچنین سیلت با ضریب تقریبی $0/71$ ، برآورد کنند. در مقایسه با نتایج تحقیق ایشان، پژوهش حاضر، بسیار مؤثرتر و دقیق‌تر در برآورد اجزای شن و رس، عمل کرده است، ولی برای جزء سیلت این‌گونه نبوده است. همچنین، ژائو و همکاران (۲۰۲۰) و ژو و همکاران (۲۰۱۸)، نیز به مطالعه ذرات رس خاک در چین اقدام کردند که تا حد زیادی با کیفیت و کارایی مدل تحقیق حاضر، در تطابق بوده است. البته مدل محاسبه شده توسط ژو و همکاران (۲۰۱۸)، برای جزء سیلت خاک در چین، دارای دقت و قابلیت اعتماد بیشتری از تحقیق حاضر بوده است که دلیل آن را می‌توان در بیش‌تر بودن ضریب تغییرات ($CV\%$) جزء سیلت و نیز بالاتر بودن دامنه تغییرپذیری آن در خاک‌های مورد مطالعه چین، دانست. این امر به تقویت مدل، کمک به‌سزایی می‌کند. زنگ و همکاران (۲۰۱۷)، به مطالعه بافت خاک با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی ارتعاشی در ادغام با شیوه اعتبارسنجی متقاطع ده گانه^۱ و الگوریتم PLS، اقدام نمودند. پارامترهای کیفیت مدل ایشان به قرار مقابل بوده است، برای رس: ضریب رگرسیون تعدیل شده $(R^2_{adj}) = 0/60$ ، میانگین مربعات خطا $(RMSE_{cv}) = 3/18$ و RPD حدود $1/57$ ، که تا حدی از مدل تخمین‌گر رس تحقیق حاضر، ضعیف‌تر عمل کرده است. برای سیلت: ضریب رگرسیون تعدیل شده $(R^2_{adj}) = 0/78$ ، میانگین مربعات خطا $(RMSE_{cv}) = 10/20$ و RPD حدود $2/11$ ، که از مدل تخمین‌گر سیلت در تحقیق حاضر، دارای کارایی بالاتری بوده است. همچنین برای مقادیر شن، بدین ترتیب بوده است: ضریب رگرسیون تعدیل شده $(R^2_{adj}) = 0/78$ ، میانگین مربعات خطا

³- Quality-accuracy indicators

¹- Ten-fold cross validation algorithm

²- Kurtosis

طیفی و باندها بازتابی قادر خواهیم بود، با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی، به بررسی و مطالعه بافت خاک در سطح بسیار وسیع، اقدام کنیم.

سیاس‌گزاری

نویسندگان پژوهش حاضر، از تیم مجرب آزمایشگاه تخصصی خاکشناسی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و نیز تیم حرفه‌ای آزمایشگاه طیف‌سنجی دانشگاه تربیت مدرس، تقدیر و تشکر می‌نماید. ایشان، همچنین از آقای دکتر سهام میرزایی به دلیل ارائه نظرات و پیشنهادات ارزنده، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنند.

حالت ضعف، در بین اجزای بافت خاک، برای بخش سیلت، بیشتر به چشم می‌خورد. دلیل اصلی این ضعف، اشتراک و همپوشانی مینرالوژیکی-طیفی ذرات سیلت با اجزاء شن و رس می‌باشد و البته کم بودن ضریب تغییرات این جزء مهم بافت خاک. پیشنهاد می‌شود، برای توسعه مدل و نیز بهبود کیفیت و کارایی لازم برای تمامی اجزای بافت خاک و به ویژه سیلت، نمونه‌های بیشتری از مناطق متنوع جغرافیایی با دامنه تغییرات بیشتر، برداشته شود و تحت فرآیند مدل‌سازی طیفی قرار گیرد. همچنین، دامنه‌های طیفی مؤثر و پرنفوذ در فرآیند تخمین بافت خاک شامل مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه بوده است، که با استفاده از این محدوده‌های

منابع

- Bahrami, A. Danesh, M. and Bahrami, M. (2022). Studying sand component of soil texture using the spectroscopic method. *Infrared Physics & Technology*, 122, 104056. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104056>.
- Bellon-Maurel, V. Fernandez-Ahumada, E. Palagos, B. Roger, J.M. and McBratney, A. (2010). Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. *Trends Anal. Chem.*, 29 (9): 1073–1081.
- Camargo, O.A. Moniz, A.C. Jorge, J.A. and Valadares, J.M. (2009). Methods of Chemical, Mineralogical and Physical Analysis of Soils Used in the Pedology Section (Technical Bulletin No. 106), Instituto Agrônômico (IAC), Campinas.
- Casa, R. Castaldi, F. Pascucci, S. Palombo, A. and Pignatti, S. (2013). A comparison of sensor resolution and calibration strategies for soil texture estimation from hyperspectral remote sensing. *Geoderma*, 197: 17–26.
- Chang, C.W. and Laird, D.A. (2002). Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N. *Soil Science*, 167: 110–116.
- Danesh, M. Bahrami, H.A. Darvishzadeh, R. and Noroozi, A.A. (2016). Investigating clay contents using laboratory diffuse reflectance spectroscopy. *Iranian Journal of RS & GIS*, 8(1), 71-94. (in Persian).
- Danesh, M. Bahmanyar, M.A. and Emadi, S.M. (2022). Reflectance study of soil silt using proximal sensing in Northern Iran. *J Civil Eng Environ Sci* 8(1): 048-056. DOI: <https://dx.doi.org/10.17352/2455-488X.000050>.
- Danesh, M. and Bahrami, H.A. (2022). Modeling of Soil Sand Particles Using Spectroscopy Technology, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, DOI: 10.1080/00103624.2022.2070638.
- Emadi, M. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Cherati, A. Danesh, M. Mosavi, A. and Scholten, T. (2020). Predicting and mapping of soil organic carbon using machine learning algorithms in Northern Iran. *Remote Sensing*. 12(14):2234.
- Guo, L. Zhang, H. Shi, T. Chen, Y. Jiang, Q. and Linderman, M. (2019). Prediction of soil organic carbon stock by laboratory spectral data and airborne hyperspectral images. *Geoderma*, 337: 32-41.

- Hong, Y. Chen, S. Liu, Y. Zhang, Y. Yu, L. Chen, Y. and Liu, Y. (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.
- Ji, W.J. Li, S. Chen, S.C. Shi, Z. Viscarra Rossel, R.A. and Mouazen, A.M. (2016). Prediction of soil attributes using the Chinese soil spectral library and standardized spectra recorded at field conditions. *Soil Till. Res.* 155, 492–500.
- Ji, W.J. Shi, Z. Huang, J.Y. and Li, S. (2014). In situ measurement of some soil properties in paddy soil using visible and near-infrared spectroscopy. *PLoS ONE*.
- Lu, P. Wang, L. Niu, Z. Li, L. and Zhang, W. (2013). Prediction of soil properties using laboratory VIS–NIR spectroscopy and Hyperion imagery, *Journal of Geochemical Exploration*, 132: 26–33.
- Mura, S. Cappai, C. Greppi, G.F. Barzaghi, S. Stellari, A. and Cattaneo, T.M.P. (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.
- Ostovari, Y. Ghorbani-Dashtaki, S. Bahrami, H.A. Abbasi, M. Dematte, J.A.M. Arthur, E. and Panagos, P. (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.
- Padarian, J. Minasny, B. and McBratney, A.B. (2019). Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data. *Geoderma Regional*, 16: e00198.
- Peng, L. Cheng, H. Wang, L.J. and Zhu, D. (2020). Comparisons the prediction results of soil properties based on fuzzy c-means clustering and expert knowledge from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. *Canadian J. of Soil Science*, 101(1): 33-44.
- Pudelko, A. and Chodak, M. (2020). Estimation of total nitrogen and organic carbon contents in mine soils with NIR reflectance spectroscopy and various chemometric methods. *Geoderma*. 368.
- Qi, F. Zhang, R. Liu, X. Niu, Y. Zhang, H. Li, H. Li, J. Wang, B. and Zhang, G. (2018). Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region. *Soil & Tillage Research*, 184: 45-51.
- Tumsavas, Z. Tekin, Y. Ulusoy, Y. and Mouazen, A.M. (2018). Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.008>.
- Viscarra Rossel, R.A. and Webster, R. (2012). Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 848–860.
- Xia, F. Peng, J. Wang, Q.L. Zhou, L.Q. and Shi, Z. (2015). Prediction of heavy metal content in soil of cultivated land: hyperspectral technology at provincial scale. *J. Infrared Millim. Waves* 34, 593–605.
- Xu, D. Ma, W. Chen, S. Jiang, Q. He, K. and Shi, Z. (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.
- Xu, S. Zhao, Y. Wang, M. and Shi, X. (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.
- Zhao, L. Hong, H. Fang, Q. Algeo, T.J. Wang, C. Li, M. and Yin, K. (2020). Potential of VNIR spectroscopy for prediction of clay mineralogy and magnetic properties, and its paleoclimatic application to two contrasting Quaternary soil deposits. *Catena*, 184:104239.

Zeng, R. Rossiter, D.G. Yang, F. Li, D.C. Zhao, Y.G. and Zhang, G.L. (2017). How accurately can soil classes be allocated based on spectrally predicted physio-chemical properties? *Geoderma* 303 (2017) 78–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.011>.