

Digital modeling of soil sand constituent using hyperspectral data

Majid Danesh^{*1}  | Hosein Ali Bahrami² 

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran. E-mail: m.danesh@sanru.ac.ir
2. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran. E-mail: bahramih@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 10.11.2021
Revised: 12.17.2021
Accepted: 02.06.2022

Keywords:

Digital mapping,
Hyperspectral modeling,
PLSR,
Sand,
Spectroscopy

ABSTRACT

Background and Objectives: Sand fraction is one of the most important soil textural segments which should be highlighted for environmental modeling operations and digital soil mapping projects. On one hand; identification, mapping and monitoring of sand content over wide scales using traditional sampling and common lab analysis procedures is time-consuming and costly, probably due to its vast spatial variability. From the other point of view, spaceborne and airborne spectroscopy (remote sensing) have some defects compared to the laboratory and field spectroscopy such as atmospheric effects, compositional and structural effects, lower spatial and spectral resolution, geometric distortions and the mixture of spectral features. Hence, to overpower the imperfection of RS technology in relation to investigating the factors with spatial changeability, an apt technology is required. With the advent of Lab Diffuse reflectance Spectroscopy (LDRS) which exploits the fundamental vibration, overtones and combination of functional groups for soil investigation, that became a promising tool related. The present research intends to hyperspectral modeling of sand fraction utilizing the mentioned proximal soil sensing tech in some parts of Mazandaran province.

Materials and Methods: In accord with supplementary data layers (geology, pedology, landuse, etc.) and stratified randomized sampling method, eventually, 128 samples from 20 cm of soil surface of Mazandaran province (scattered parts), were gathered. First of all, sample-set subdivided into two subsets: calibration and validation. Afterwards, using the hyperspectral analyses, multivariate regression analysis-PLSR method with the leave-one-out cross-validation technique and some preprocessing algorithms such as: spectral averaging, smoothing and 1st derivative (Savitzky-Golay derivation algorithm), the definitive calibration model with two & four latent vectors according to indices such as R, R², RMSE, RPD and RPIQ were made.

Results: During the present research based on the sand hyperspectral modeling in the calibration subset containing 96 samples as well as the validation subset composing of 32 standalone samples, it has been showed the first two and four LVs out of the seven LVs can provide the best estimate of the soils of the study province. Consequently, the calibration process of sand hyperspectral model was done based on the first four LVs and the full LOOCV procedure. Because these number of LVs are able to concentrate the info-variance of sand variable more than 60% and likewise, the info-variance of spectral variables more than of 98%. The best calibrated hyperspectral model predicting sand components resulted with these specs: R_c=0.76, R_c²=0.57, RMSE_c= 9.77 and SE_c of about 9.82. The

correlation coefficients (R) of sand contents with the effective spectral domains were calculated as: UV-390nm= 0.46, Vis-510 to 540nm about 0.53, 680 to 690 about 0.55, NIR- 950 to 970 about 0.67 and 1100nm= 0.70, SWIR- 1410 nm=0.76, 1860 to 1900 about 0.76, 2180 to 2220 about 0.77; which the specified spectral bands (spectral ranges) with the maximum of R contents indicating their highly impact and influence as the independent predictors on the sand parameter hyperspectral modeling processes at the studied soils of Mazandaran province. Furthermore, the most influential spectral domains involved in the modeling process of sand particles were determined as follows: UV-390 nm, Vis-440-540 nm, NIR- 740-990 nm, SWIR- 1430-1890, 1930, 2190-2240, 2330-2440 nm, which these results were in agreement with others. The quality of the calibrated sand hyperspectral model via assays such as Hotelling, adjusted leverage and residual variances was also confirmed. The accuracy assessment specs were as: $R_p= 0.83$, $R^2_p= 0.68$, $RMSEP= 8.68$, $SEP= 8.72$ and $bias= -1.26$.

Conclusion: Results indicate the apt hyperspectral analyses to estimate the sand constituents of the study region. Accordingly, based on LV=2: $RPD_c= 1.51$, $RPIQ_c= 2.44$, $RPD_p= 1.78$ and $RPIQ_p= 2.45$, additionally for LV=4: $RPD_c= 1.54$, $RPIQ_c= 2.48$, $RPD_p= 1.75$ and $RPIQ_p= 2.41$ have been gained. On the basis of the RPIQ values which were more than 2, it can be concluded the models are able to estimate the sand contents of Mazandaran soils satisfactorily and showing the acceptable quality of the predicting models utilizing the hyperspectral data. Our results can be the starting point to accurate mapping of sand constituents of soil texture using the RS platforms. It is noteworthy, the characterization of key wavelengths in the hyperspectral modeling of sand components, the upscaling operation as well as constructing the new airborne/satellite hyperspectral sensors can be bettered using the principle wavebands affecting the hyperspectral process so that providing the more precise hyperspectral studying of soil texture constituents using the aerial or space platforms.

Cite this article: Danesh, Majid, Bahrami, Hosein Ali. 2022. Digital modeling of soil sand constituent using hyperspectral data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28 (4), 145-165.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19584.3505

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مدل‌سازی رقومی جزء شن خاک با داده‌های ابرطیفی

مجید دانش*^۱ | حسینعلی بهرامی^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار حفاظت و فرسایش خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

رایانامه: m.danesh@sanru.ac.ir

۲. استاد فیزیک، حفاظت و فرسایش خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. رایانامه: bahramih@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: جزء شن از مهم‌ترین اجزای بافت خاک بوده که برای عملیات مدل‌سازی زیست‌محیطی و پهنه‌بندی رقومی خاک، باید مورد توجه واقع شود. از طرفی، به دلیل تغییرپذیری مکانی این جزء؛ تشخیص، پهنه‌بندی و پایش آن، در مقیاس‌های وسیع، با استفاده از شیوه‌های سنتی رایج و عملیات تجزیه و تحلیل معمول آزمایشگاهی، بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. از دیدگاه دیگر؛ دورسنجی هوایی و فضایی در قیاس با طیف‌سنجی میدانی و آزمایشگاهی دارای نواقصی هم‌چون اثرات جوی، آثار ساختاری و ترکیبی طیفی، پایین‌تر بودن تفکیک طیفی و مکانی، اختلالات هندسی و نیز فرآیند اختلاط طیفی است. بنابراین برای غلبه بر این نواقص و برای مطالعه عوامل دارای تغییرپذیری مکانی، نیازمند فن‌آوری مناسبی است. با ظهور طیف‌سنجی بازتابی پراکنشی آزمایشگاهی که از لرزش‌های بنیادین، فرعی و ترکیبی گروه‌های عاملی (FGs) بهره می‌برد، آن، به‌عنوان ابزاری نویدبخش در مطالعه اجزای خاک، معرفی شد. طی پژوهش حاضر، از طیف‌سنجی بازتابی مجاورتی، برای مدل‌سازی ابرطیفی اجزای شن در قسمت‌هایی از استان مازندران استفاده شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷	
واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی رقومی، شن، طیف‌سنجی، مدل‌سازی ابرطیفی، PLSR	
	مواد و روش‌ها: جمعاً ۱۲۸ نمونه از عمق ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک، براساس روش نمونه‌برداری SRS و با کمک اطلاعات جانبی هم‌چون: زمین‌شناسی، کاربری اراضی، نقشه راه‌ها، و خاک‌شناسی استان، جمع‌آوری شد. در ابتدا، مجموع نمونه‌ها به دو قسمت برای عملیات واسنجی و اعتبارسنجی، تقسیم شد. با بهره‌گیری از تحلیل ابرطیفی، رگرسیون چندمتغیره PLSR و بر اساس تکنیک LOOCV و عملیات پیش‌پردازش طیفی هم‌چون: میانگین‌گیری، هموارسازی و مشتق اول طیفی بر اساس الگوریتم ساویتسکی-گولای، مدل تخمینی بر مبنای شاخص‌های تحلیلی هم‌چون همبستگی دوطرفه پیرسون (R)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی (RMSE)، و نیز شاخص‌های اعتبارسنجی RPD و RPIQ، ایجاد و بررسی شد.

مقدمه

اطلاع از مقادیر و نحوه توزیع مکانی اجزای شن، برای پایش و پهنه‌بندی مناطق مستعد به بیابان‌زایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲۷) که نیاز مبرم به اطلاعات به‌روز، بهنگام، و دقیق از این پارامتر خاک، را در بسیاری از پژوهش‌ها ایجاد می‌کند (۲۷ و ۲۹). از طرفی، تحلیل و نقشه‌بندی خصوصیات بافتی خاک در مقیاس‌های وسیع، مستلزم کارهای میدانی انرژی‌بر، پرهزینه و روش‌های آزمایشگاهی دشوار است که غالباً وقت‌گیرند (۱۰، ۱۷، ۲۵، ۲۶). از سوی دیگر، برخی پژوهش‌گران، استفاده از تابش‌های منعکس‌شده از سطح خاک را به‌عنوان شیوه جایگزین برای ارزیابی و تعیین برخی خصوصیات خاک عنوان کرده‌اند (۱، ۲، ۸، ۱۰، ۳۵، ۳۶، ۳۷). طبق این روش، تغییرات در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی خاک‌ها، سبب ایجاد پدیده‌های طیفی بارز^۱ (DSFs) می‌شود، که از طریق تحلیل‌های ابرطیفی در دامنه بازتابی ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر (مرئی- مادون‌قرمز نزدیک)، قابل شناسایی و آشکارسازی خواهند بود (۲، ۸، ۱۰، ۲۶، ۳۵، ۳۶). طیف‌های انعکاسی خاک، تحت‌تأثیر بسیاری از خصوصیات هم‌چون: اجزای بافت، رطوبت، و ماده آلی است (۱۰، ۲۴، ۲۵، ۲۶)، بدین‌ترتیب؛ تحلیل ابرطیفی آزمایشگاهی و در-محل بازتاب خاک^۲ در دامنه طیفی VNIR، به‌عنوان ابزاری امیدبخش در تعیین برخی پارامترهای خاک است که همراه با مزایایی هم‌چون: سرعت، غیرتخریبی بودن، به‌صرفه از نظر هزینه و عدم به‌کارگیری مواد شیمیایی خطرناک است (۸، ۲۶، ۳۷). طیف‌سنجی هوا- و فضا‌برد، دارای مشکلاتی نسبت به طیف‌سنجی آزمایشگاهی و میدانی (LS/FS) است، هم‌چون: تأثیرات اتمسفری، تأثیرات ساختاری و ساختمانی، قدرت تفکیک مکانی و طیفی

کم‌تر، اعوجاج و انحرافات هندسی و نیز اختلاط طیفی پدیده‌ها (۲۰، ۲۳). فن‌آوری طیف‌سنجی بازتابش پراکنشی آزمایشگاهی (LDRS)، از علائم طیفی مواد در اثر انتقالات الکترونی اتم‌ها، خمش و کشش ارتعاشی گروه‌های عاملی^۳ که مولکول‌های مواد را تشکیل می‌دهند، بهره می‌برد (۳۴). بر این اساس، طیف تابش الکترومغناطیس^۴، در دامنه‌های مرئی (Vis) و مادون‌قرمز نزدیک/موج‌کوتاه (NIR/SWIR)، حاوی اطلاعات مفیدی در مورد اجزای تشکیل‌دهنده خاک خواهد بود که با تکنیک‌های تحلیل ابرطیفی خاص، قابل آشکارسازی و بارزسازی خواهند بود (۱۰، ۱۶، ۲۶، ۳۴، ۳۷). مضافاً، در پژوهش‌های مبتنی بر کاربرد طیف‌سنجی آزمایشگاهی (VNIRS-DRS) در مطالعه خصوصیات خاک، نحوه پایش تیمار مناسب داده‌ها و استراتژی‌های عملیات واسنجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱، ۲، ۶، ۲۴، ۲۵، ۳۵، ۳۶). تعداد اندکی مطالعات در زمینه تأثیر اجزای بافت بر بازتاب طیفی خاک صورت گرفته، که بیانگر تأثیر بارز بافت بر طیف‌های انعکاسی است. به‌طوری‌که، نقش اجزای بافت (۱۰)، به‌خصوص مقادیر شن بر بازتاب‌های طیفی، بسیار مهم بیان شده است (۲۴، ۲۶، ۳۰). پژوهش انجام شده توسط کاگان و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد، اندازه ذرات و نیز اجزای بافت خاک؛ به دلیل تأثیر پراکنشی نور^۵، در باندهای بازتابی ۱۹۰۰ و نیز محدوده ۲۰۰۰ الی ۲۲۰۰ نانومتر، بسیار حساس بوده و براساس این محدوده و طول‌موج‌ها، قابل‌شناسایی و مطالعه می‌باشند (۱۸). هم‌چنین مطالعات کاربردی بودن طیف‌های "بازتاب رقیق‌شده کل" (ATR)^۶، در تعیین اجزای بافت، نشان داد که

3- Vibrational stretching & bending of structural groups

4- the EM radiation spectrum

5- Light scattering influence

6- Attenuated Total reflectance spectra

1- Diagnostic Spectral Features

2- In-situ/Lab hyperspectral analysis

تخمین اجزای شن به‌طور رضایت‌بخشی با $R^2=0/88$ و $RPD < 3$ قابل انجام است (۱۳). همچنین برخی مطالعات، از طیف‌های بازتابی دورسنجی شده، برای پهنه‌بندی بافت خاک سطحی با قدرت تفکیک مکانی بالا، در مقیاس مزرعه استفاده کردند و نیز در برخی مناطق، با استفاده از سنجنده‌های هوابرد این کار انجام شده است (۱۴، ۱۹). پژوهش صورت گرفته توسط راولین و همکاران (۲۰۱۱)، به تخمین پارامتر PSD بر اساس فن‌آوری VNIR-DRS در خاک‌هایی با انواع مختلف مواد مادری، پرداخته است. ایشان نشان دادند، استفاده از مدل‌های آماری برای تخمین اجزای بافت خاک با استفاده از تحلیل ابرطیفی VNIR، بر مبنای نوع مواد مادری آن‌ها، در برخی مناطق، می‌تواند سبب سهولت در حصول نتایج گردد (۲۸). هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی ابرطیفی اجزای شن بافت خاک، به‌عنوان فاکتور غالب طیفی و نیز ارزیابی پتانسیل طیف‌سنجی بازتابی آزمایشگاهی مرئی- مادون‌قرمز نزدیک و موج‌کوتاه (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر)، در آشکارسازی رفتارها و علائم طیفی اجزای شن، با بهره‌گیری از روش‌های آنالیز پیشرفته ابرطیفی-آماری، در بخش‌هایی از استان مازندران بوده است.

مواد و روش‌ها

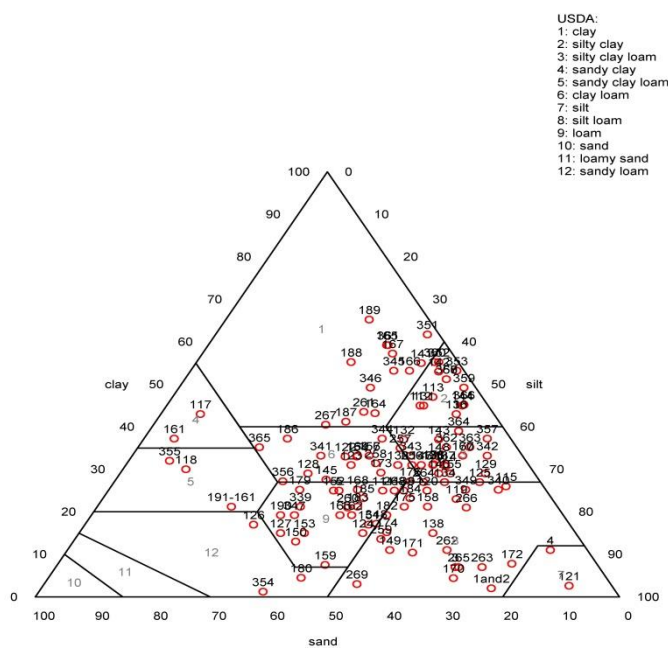
برای نمونه‌برداری، براساس اطلاعات مختلف زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و نقشه راه‌ها، تعداد ۱۲۸ نمونه و بر اساس روش طبقه‌بندی شده تصادفی (۱۸)، از ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک بخش‌های مختلف استان مازندران، جمع‌آوری و موقعیت مکانی آن‌ها توسط جی‌پی‌اس دستی (Garmin Montana650)، با دقت تقریبی ۴ متر، ثبت شد (شکل ۲). شایان ذکر است، عملیات نمونه‌برداری در اواخر مردادماه انجام شد، که رطوبت

خاک به‌دلیل عدم بارش باران به مدت تقریباً بیش از ۳۵ روز متوالی و نیز حداکثر بودن دمای محیط، در حداقل خود قرار داشته است. رژیم رطوبتی زیریک، قسمت غالب خاک‌های استان را در بر می‌گیرد. البته، برخی قسمت‌های غربی استان دارای رژیم رطوبتی (SMR) یودیک و مقدار بسیار اندکی نیز آکوئیک می‌باشد. همچنین بخش اعظم استان دارای رژیم حرارتی خاک (STR) ترمیک (۶۶٪) و سپس مزیک (۳۳٪) و کراییک (۱٪) می‌باشد (۱۲). دامنه تغییرات ارتفاع در سطح استان از حدود ۵- متر (بالتر از سطح دریا) در مناطق ساحلی الی بیش از ۳۰۰۰ متر در مناطق کوهستانی می‌باشد. در استان مازندران ۵ رده خاک بر مبنای طبقه‌بندی خاک^۱ USDA، شامل مالی‌سول، انتی‌سول، اینسپتی‌سول، آلفی‌سول و آلتی‌سول، به همراه ۱۲ زیررده وجود دارند. مالی‌سول‌های استان دارای چهار زیررده اصلی شامل: Udolls, Rendolls, Aquolls و Xerolls می‌باشد. آلفی‌سول‌ها دارای دو زیررده اصلی می‌باشد: Aqualfs و Udalfs. آلتی‌سول‌ها دارای یک زیررده ساده بنام Humults می‌باشد که به‌صورت بسیار جزئی و محدود در استان وجود دارد که شامل خاک‌های آبشویی شده تحت پوشش گیاهی طبیعی جنگل، می‌باشد. انتی‌سول‌ها نیز دارای سه زیررده اصلی به‌نام‌های Orthents, Fluvents و Aquents می‌باشد که به‌طور غالب در شالیزارهای و مزارع برنج استان مازندران، حضور دارند. اینسپتی‌سول‌های استان مازندران دارای افق B ضعیف (توسعه نیافته) بوده که از دو زیررده اصلی تشکیل می‌شود: Aquepts و Xerepts. رده غالب مناطق نمونه‌برداری شده شامل اینسپتی‌سول، انتی‌سول، مالی‌سول و آلفی‌سول بوده است. در آزمایشگاه خاک‌شناسی، پس از عملیات خرد کردن کلوخه، هوا خشک شدن و رد شدن از الک ۲

1- USDA Soil taxonomy

نوسان بوده است. کلاس های کمی و کیفی بافت نمونه های جمع آوری شده در سطح استان در شکل ۱ مشخص شده است. هم چنین، مقدار رطوبت وزنی نمونه های خاک هوا- خشک استان (پس از گذشت ۴۸ ساعت در دمای آزمایشگاه) از حداقل ۱/۲۵ الی حداکثر ۷/۳ درصد، متغیر بوده است.

میلی متری؛ هر نمونه به دو قسمت تقسیم شد: قسمت اول برای تعیین نسبت اجزای شنی بافت، با استفاده از روش هیدرومتر (۴) تخصیص داده شد و قسمت دوم نیز، به آزمایشگاه طیف سنجی (اتاق تاریک)، برای تحلیل و سنجش های طیفی منتقل شد. تنوع کیفی بافت نمونه ها از لومی شنی الی سیلتی و رسی، در



شکل ۱- کلاس های بافت خاک نمونه های جمع آوری شده در سطح استان مازندران.

Figure 1. Soil texture classes of the collected sampled points throughout the Mazandaran province.



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه برداری شده در استان مازندران.

Figure 2. Geolocation of sampled points throughout the Mazandaran province.

است (۱۰)؛ برای انجام تحلیل‌های آماری- طیفی به‌کار گرفته شد. بدین طریق، نمونه‌های خاک، اسکن شده و بازتاب‌های مطلق در دامنه طیفی ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر و با قدرت تفکیک طیفی خروجی ۱ نانومتر، سبب تولید ۲۱۵۱ نقطه- داده طیفی (SDP) به ازای هر نمونه خاک، گردید.

تحلیل آماری- طیفی PLSR، روشی است که از طریق بهره‌گیری از تکنیک‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و رگرسیون خطی چند متغیره (MLR)، بر مشکلات چند- همخطی‌گری و خودهمبستگی^۲ بین متغیرهای طیفی و نمونه‌ها، غلبه می‌کند. همچنین، PLSR، یک سری از اجزا یا بردارهای پنهان (LVs) را می‌یابد که سبب کاهش هم‌زمان و تجزیه ماتریس متغیرهای طیفی تخمین‌گر (X) شده و تا جای ممکن سبب همبستگی بین متغیرهای پاسخ (Y) با متغیرهای مستقل (X) می‌شود (۱۰، ۱۵، ۲۶، ۳۱، ۳۶، ۳۷). بردارهای پنهان^۳ (LV)، حاوی اطلاعات اندازه‌گیری شده طیفی بوده و از آن‌ها برای برآورد متغیر وابسته مورد نظر، استفاده می‌شود. هدف شیوه PLSR ساخت و ایجاد یک مدل خطی می‌باشد: $Y = XB + E$ که در آن، Y: بردار متمرکز^۴ متغیرهای پاسخ؛ X: ماتریس متمرکز تخمین‌گرها؛ B: ماتریس ضرایب؛ و E: ماتریس باقی‌مانده‌ها است.

در عملیات پیش‌پردازش طیفی، برای کاهش آثار نویز و تداخلات ناشی از تجهیزات نوری (هندسه تابش و نویز منبع نوری)، داده‌های طیفی خام، به ازای هر ۱۰ نانومتر، به‌طور یکنواخت، مجدداً نمونه‌برداری شدند (شکل ۳). بنابراین تعداد متغیرهای تخمین‌گر (مستقل) برای هر نمونه از ۲۱۵۱ به ۲۱۶ باند طیفی، کاهش یافت، که از این مرحله در روش‌های پردازش طیفی، به روش کاهش ابعاد ابرطیفی، یاد می‌شود.

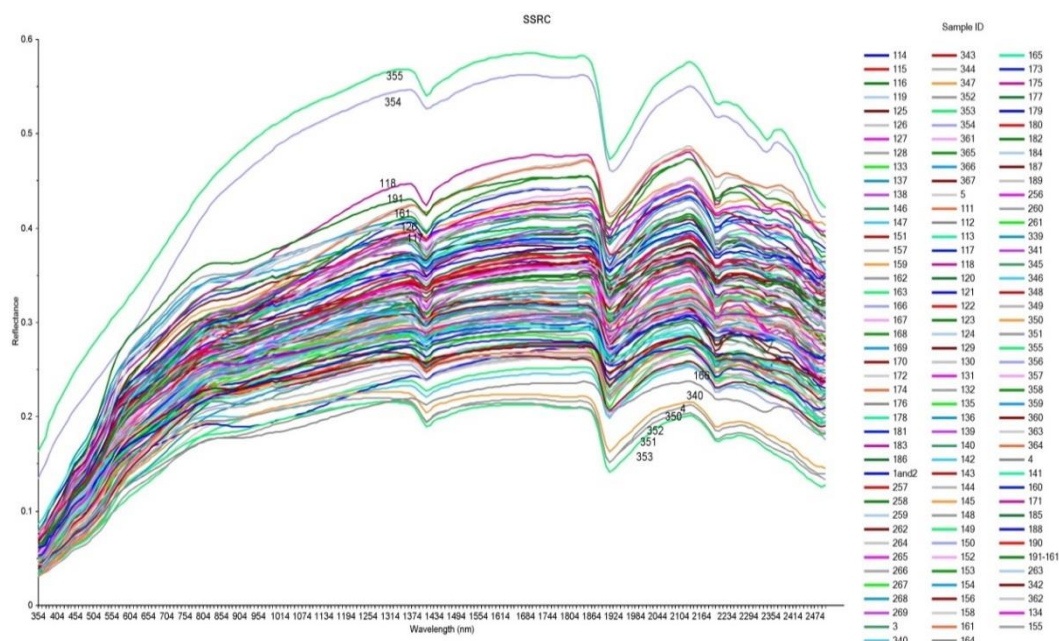
برای شیوه طیف‌سنجی بازتابی ابرطیفی، نمونه‌های خاک جهت بررسی‌های طیفی به اتاق تاریک منتقل شدند. هر نمونه خاک (هوا-خشک و الک شده)، در یک پتری‌دیش به قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر قرار داده شده و با کاردک سطح آن هموار گردید. ضخامت تمامی نمونه‌ها بیش از ۱۰ میلی‌متر بوده است، که بیش از ضخامت طیفی تئوریک قابل سنجش برای بزرگ‌ترین اندازه ذرات (برمبنای اجزای بافت) بوده است. علائم تابشی از طریق فیبرهای نوری (fiber-optic) با میدان دید اسمی مخروطی ۲۵ درجه، جمع‌آوری شدند. عملیات، بر اساس فاصله هدف- سنجنده، حدود ۱۰ سانتی‌متر که متناظر با یک مساحت اسمی ۵ سانتی‌متر مربع بر روی نمونه بوده، انجام شد. از تراز حبایی متصل شده به پایه فیبر نوری، برای قرارگیری در وضعیت عمودی و تطبیق آن با مرکز زاویه دید لحظه‌ای زمینی (GIFOV) استفاده شد. تابش با استفاده از یک لامپ حبایی تقریبی ۵۰ وات هالوژن با منبع تغذیه مجزا ایجاد شد. منبع نوری در فاصله تقریبی ۵۰ سانتی‌متری با زاویه ارتفاعی ۴۵ درجه نسبت به هدف قرار گرفت. قبل از آغاز نمونه‌برداری طیفی، از گزینه جریان تاریک (DC process)، برای افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نیز از مرجع سفید اسپیکترالون، برای کالیبره‌کردن انعکاس طیفی، بهره برده شد (به‌همراه عملیات بهینه‌سازی عمل‌کرد سنجنده طیفی^۱). کیفیت طیف‌های سنجنده شده، بطریق بصری مورد بازبینی قرار گرفت (شکل‌های ۳ و ۴)، و در صورت وجود نویزهای تصادفی، عملیات طیف‌سنجی مجدداً انجام شد. بنابراین، میانگین ۲۵ طیف بازتابی متوالی به ازای هر چرخش ۹۰ درجه‌ای نمونه‌ها؛ که این عمل برای پرهیز از خطاهای طیفی نشئت گرفته از: تأثیر اندازه ذرات، آثار سایه، زبری سطح و نیز هندسه تابش بوده

2- Autocorrelation/multi-collinearity
3- Latent Vector
4- Mean-Centered (MC)vector/factor

1- Sensor efficiency optimization

الگوریتم مشتق اول^۱ و نیز عملیات متمرکزسازی (MC)، مورد آزمون قرار گرفتند. از فرآیند اعتبارسنجی متقاطع (CV) برای کل نمونه‌ها، جهت تعیین پیش‌پردازش مطلوب، استفاده شد (۵).

هم‌چنین برای هموارسازی و کاهش نویزهای تصادفی و موقتی، از فیلتر هموارساز SG مرتبه ۲ به‌مراه ۳ نقطه هموارساز و نیز هسته تقارنی بهره گرفته شد. هم‌چنین طیف‌های خام و هموارسازی شده، توسط



شکل ۳- طیف‌های خام نمونه‌های خاک آماده شده بر مبنای شماره نمونه.
Figure 3. Raw spectra of the supplied soil samples based on their numbers.

مناسب این ویژگی، صحیح بوده است. بر اساس آزمون نرمال کولموگروف-اسمیرنوف (جدول ۲)، تست Box-plot و Q-Q plot مشخص شد که توزیع مقادیر شن نرمال بوده و فاقد داده پرت می‌باشد.

نتایج و بحث

آنالیز واریانس بافت نمونه‌ها (جدول ۱)، مشخص کرد که پارامتر شن دارای ضریب تغییرات ۷/۵۹٪ بوده و با دامنه ۶۰٪ از تغییرات مناسبی برخوردار بوده است، بنابراین تلاش برای نمونه‌برداری بر اساس لایه‌های اطلاعاتی مذکور، جهت تغییرات

جدول ۱- آنالیز بافت خاک نمونه‌ها.

Table 1. The analysis of soil texture of samples (ANOVA-basis).

متغیر Variable	کمینه Min	بیشینه Max	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	میانگین Mean	میانگین Median	مد Mode	انحراف معیار SD	دامنه Range	ضریب تغییرات CV
Sand	1	61	0.213	-0.745	25.26	26	30	15.07	60	59.7
Silt	5	90	-0.077	1.2	46.1	45.4	50.6	14.19	84.9	30.7
Clay	1	65	0.197	-0.369	30.1	30.3	33.2	14.4	64	47.8

جدول ۲- مشخصات آزمون نرمالیتی کولموگروف-اسمیرنوف بر مبنای منحنی توزیع تجمعی؛ پارامتر شن.

Table 2. KS normality test based on the cumulative distribution curve: sand parameter.

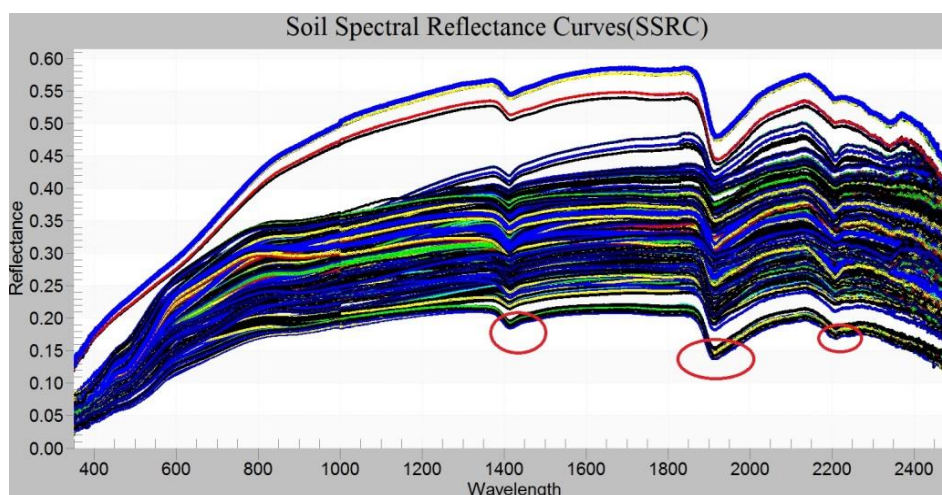
وضعیت نرمال بودن Normality	سطح معنی‌داری Sig level	p-value	حد بحرانی Critical Value	آماره کولموگروف-اسمیرنوف KS Statistic	شن Sand
نرمال Normal	1%	0.5387	0.0896	0.0702	

پدیده‌های جذبی و رفتارهای طیفی که در منحنی‌های طیفی بازتابی رخ می‌دهند (UV-Vis-NIR-SWIR)، می‌توان اجزای شنی را مورد مطالعه قرار داد، که دلیل آن ارتعاشات ناشی از برهم‌کنش انرژی در حضور یا عدم حضور مولکول‌های هیدروکسیل و آب ($[H\backslash O\backslash H] + [O\backslash H]$) می‌باشد (شدت SAFs^۱ در ارتباط غیرمستقیم با اجزای شن است) (۵، ۲۹). پدیده‌های طیفی حوالی ۲۰۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، می‌تواند مربوط به مینرالوژی ذرات باشد (۳۲). خاک‌های شنی، بازتاب بیشتری نسبت به خاک‌های رسی نشان می‌دهند که به دلیل فراوانی ماکرو پورها و بیش‌تر بودن فصل مشترک خاک- هوا بوده، که سبب پراکنش/بازتاب چندگانه^۲ می‌شود. شن در بین اجزای بافتی خاک، دارای آثار بسیار مهم و بارزی بر رفتارهای طیفی، پاسخ‌ها و امضاها طیفی خاک در کل دامنه طیفی VNIR، می‌باشد (۱۰، ۲۹).

در تحلیل منحنی بازتاب طیفی خاک (SSRC)، رفتارها و پاسخ‌های طیفی خاک، در امتداد مناطق مختلف نمونه‌برداری، دارای تغییراتی است که آن به دلیل ترکیب پارامترهای مختلف خاک و نیز تغییرات خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی القاء شده، توسط فرآیندهای خاک‌زایی می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴: اختلاف بین منحنی‌های طیفی نمونه‌های جمع‌آوری شده). هم‌چنین، تغییرات در شدت بازتاب غالباً به دلیل تفاوت و اختلافات در اندازه ذرات خاک و اجزای بافت خاک می‌باشد، به طوری که خاک‌های دارای مقادیر کم‌تر رس و مقادیر بیش‌تر شن، دارای مقادیر بالاتری از انرژی بازتاب شده در کل طیف بازتابی، می‌باشند (۱۰، ۱۱)، که بر این اساس؛ دارای یک شکل افزایشی بازتاب تقریباً بین ۱۰۰۰ الی ۱۸۰۰ و کاهشی در قسمت باقی‌مانده طیف مادون قرمز نزدیک می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴). با در نظر گرفتن

1- Spectral Absorption Features magnitude

2- Multiple reflection/scattering



شکل ۴- محل قرارگیری SAFs بر روی منحنی‌های بازتابش طیفی (SSRC) نمونه‌های خاک.

Figure 4. The SAFs on the Soil spectral reflectance curves of sampled points.

۳)، استیودنت تی- تست (Student's T test) و لون- تست (Levene's test) بترتیب برای اثبات مشابه بودن: توزیع نرمال در دو گروه، میانگین و واریانس، استفاده شد (۲۲)، که نتایج آن‌ها بیانگر شباهت کامل دو گروه در سطح معنی‌داری ۱٪ بوده‌اند.

برای عملیات واسنجی مدل ابرطیفی شن، در ابتدا، نمونه‌ها به‌طور تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند: ۲۵٪ نمونه‌ها برای اعتبارسنجی و ۷۵٪ آن‌ها برای ایجاد مدل مورد استفاده قرار گرفتند. برای اطمینان از توزیع مناسب نمونه‌ها و نیز مشابه بودن این دو گروه، از آزمون‌های نرمال کولموگروف-اسمیرنوف (جدول

جدول ۳- نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KS) در دو گروه واسنجی و اعتبارسنجی مدلینگ شن.

Table 3. The results of KS test based on calibration and validation subsets of sand modeling.

فرض نرمال بودن Normality	p-value	حد بحرانی Critical	آماره کولموگروف-اسمیرنوف KS	سطح معنی‌داری Sig. level	تعداد نمونه Sample	
تأیید	0.611	0.103	0.0764	1%	96	واسنجی
تأیید	0.957	0.175	0.0879	1%	32	اعتبارسنجی

حداقل مربعات جزئی (RMSE) و تعداد مطلوب فاکتور پنهان (LVs) می‌باشد، بهره جست (۲۱). بنابراین، برای دستیابی به تعداد فاکتورهای مطلوب مدل و نیز پرهیز از خطای بیش‌تخمین، از روش اعتبارسنجی متقاطع با متد حذف تکی کامل (FLOOCV) استفاده شد. بر اساس آنالیز متغیر وابسته و متغیرهای مستقل (باندهای ابرطیفی) (شکل

از آن‌جایی‌که، متغیرهای تخمین‌گر (مستقل (X)) دارای "چند-هم‌خطی و خود-همبستگی و چند-همبستگی"^۱ زیادی می‌باشند، بنابراین برای ایجاد مدل ابرطیفی تخمین‌گر مناسب که فاقد خطای بیش‌برازش و یا کم‌برازش باشد، باید از مدل مناسب که دارای

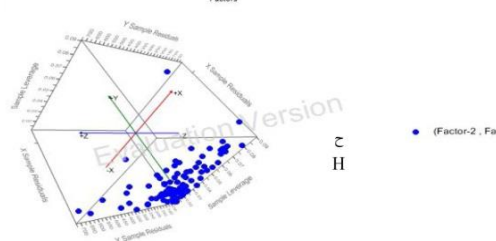
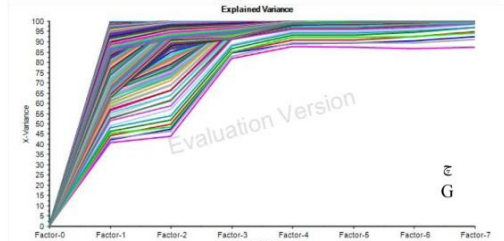
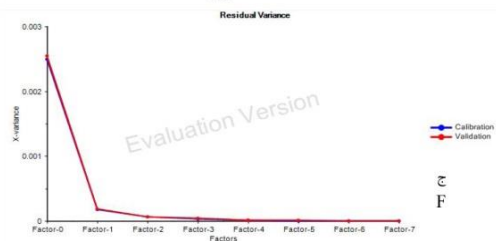
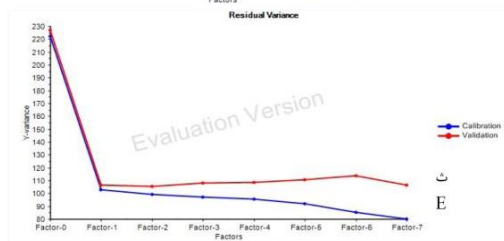
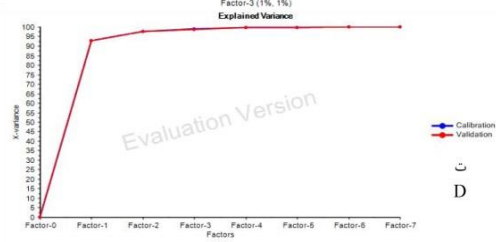
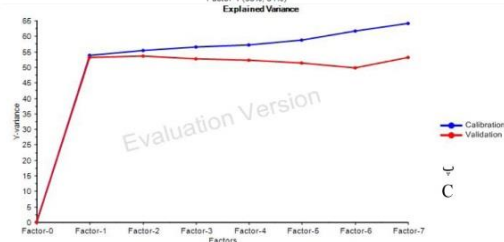
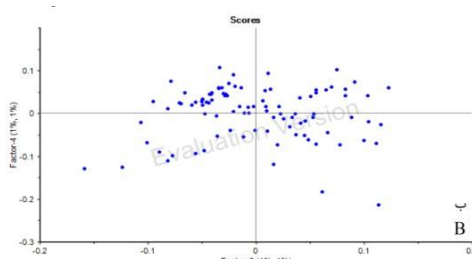
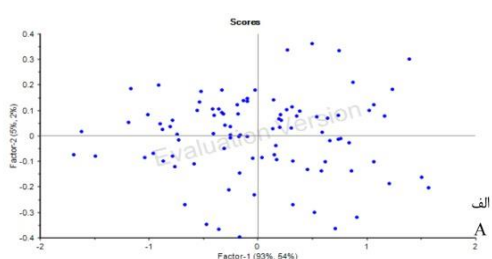
^۱- Multi-collinearity/autocorrelation/multi-interconnection

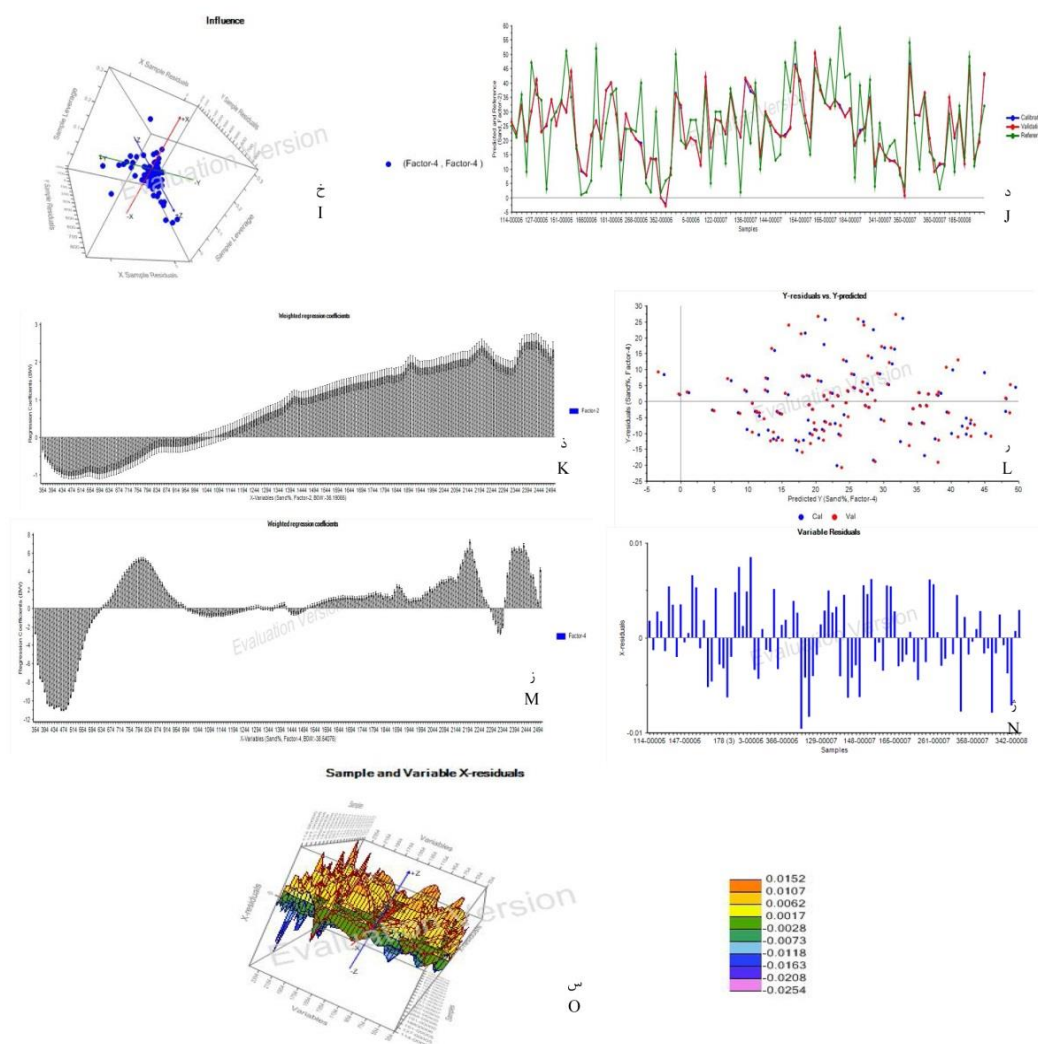
حاصل از تست لوریج و آزمون هتلینگ، معلوم شد غالب مقادیر باقی‌مانده کم‌تر از حد لوریج و آماره هتلینگ بوده است که بیانگر عدم حضور داده‌های نامتجانس است (شکل ۵-د، ژ، س). سپس بر مبنای ضرایب بتا، آنالیز وزنی و نیز با استفاده از تست عدم قطعیت مارتن، طول‌موج‌های مؤثر و معنی‌دار، تعیین و محاسبه گردید (شکل ۵-د، ذ، ز، ژ). بدین ترتیب مؤثرترین دامنه‌های طیفی در برآورد اجزای شنی بافت، نیز مشخص شدند (شکل ۵-د، ذ، ز، ژ). که بر این اساس: بازه‌های بازتابی ماوراءبنفش، مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج‌کوتاه (UV-Vis-NIR-SWIR)، در بررسی اجزای شنی خاک استان مازندران، نقش مهمی ایفا کرده‌اند (شکل ۵-ذ، ز). به‌علاوه، تست نرمال بودن مقادیر باقی‌مانده^۲ بر اساس ۲ و ۴ مؤلفه اصلی و نیز مقایسه مقادیر باقی‌مانده با مقادیر تخمین‌شده (y-residual vs y-predicted) بیانگر کیفیت خوب مدل تخمین‌گر شن در خاک‌های استان مازندران، است (شکل ۵-د، ر، ژ). بنابراین، بر اساس آزمون IFt و نیز بررسی مقادیر واریانس باقی‌مانده نمونه‌ها در زیرمجموعه واسنجی (متغیرهای پاسخ و تخمین‌گر)، مشخص شد که غالب نمونه‌ها در رنج نرمال تأثیر قرار داشته (شکل ۵-ح، خ، د، ر، ژ، س)، و بدین ترتیب، نهایتاً؛ مدل تخمین‌گر مقادیر شن استان مازندران بر اساس ۲ و ۴ مؤلفه اصلی، به‌ترتیب، با این مشخصات، کالیبره گردید: همبستگی دوطرفه پیرسون (R_C) حدود ۰/۷۴۵ و ۰/۷۵۵، ضریب تبیین (R^2_C) حدود ۰/۵۵ و ۰/۵۷، میانگین مربعات خطای کالیبراسیون ($RMSE_C$) حدود ۹/۹۵ و ۹/۷۷، خطای استاندارد کالیبراسیون (SE_C) حدود ۱۰ و ۹/۸۲، و نیز انحراف (bias) مشخص (شکل ۶)، که به‌عنوان

۵- الف، ب، پ، ت، ث، ج، چ)، و نیز مقادیر حداقل مقادیر مربعات خطا ($RMSE_{cv}$) و مقادیر حداکثر ضرایب تبیین در مجموعه کالیبراسیون (R^2_{cv}) (شکل ۵-ث، ج، ر، ژ، س)، مشخص شد که برای بررسی مقادیر شن منطقه مورد بررسی، مطلوب‌ترین تعداد فاکتورها، بر اساس ۲ و ۴ فاکتور پنهان اول بوده است ($LV=2/LV=4$)، که بیش‌ترین واریانس توصیفی را در خود گنجانده است (شکل ۵-الف، ب، پ، ت، ح، خ، ر، ژ). بدین ترتیب که، بر اساس واریانس مقادیر باقی‌مانده مستقل و وابسته و نیز واریانس توصیفی متغیرهای طیفی و شن (شکل ۵-الف، ب، پ، ت، ث، ج، چ)، بخش اعظم تغییرات طیفی و نیز تغییرات پارامتر شن مورد بررسی، قابل بررسی و مطالعه می‌باشد. به‌گونه‌ای که در شکل ۵-الف، ب، پ، ت، مشاهده می‌شود، ۲ مؤلفه پنهان نخست، قادر به تمرکز ۵۸٪ واریانس مقادیر وابسته (شن) و ۹۵٪ واریانس مقادیر مستقل طیفی شده‌اند، به‌علاوه؛ ۴ فاکتور اول نیز، بیش از ۶۰٪ واریانس مقادیر شن و بیش از ۹۸٪ واریانس تباین طیفی^۱ را در خود جای داده است، که همین عامل مانع از بیش‌برازش مدل خواهد شد و از خطای چند هم‌خطی‌گری و خودهمبستگی بین متغیرهای طیفی، نیز جلوگیری خواهد کرد. هم‌چنین بر اساس آزمون هتلینگ که براساس لوریج تعدیل‌شده استوار است (شکل ۵-ر، ژ، س) و نیز آزمون تأثیر (IFt) (شکل ۵-ح، خ)، مشخص شد که بیش از ۹۰٪ نمونه‌های این مجموعه، دارای تأثیر بسیار بارز و قوی در فرآیند تخمین مقادیر شن و عملیات مدلینگ بوده‌اند که این امر بیانگر توزیع متوازن نمونه‌ها دارد. بر اساس آزمون تأثیرپذیری (IFt) و نیز مقادیر باقی‌مانده واریانس

خاک استان مازندران، با دو شاخص آماری تحلیل گر (عملیات مدلینگ ابرطیفی پارمتر خاک): RPD و RPIQD (۳، ۷)، محاسبه و تعیین شدند. بدین ترتیب: بر اساس $LF=2$: RPD_C : ۱/۵۱، $RPIQ_C$: ۲/۴۴ و بر اساس $LF=4$ نیز RPD_C : ۱/۵۴ و $RPIQ_C$: ۲/۴۸ محاسبه شده است.

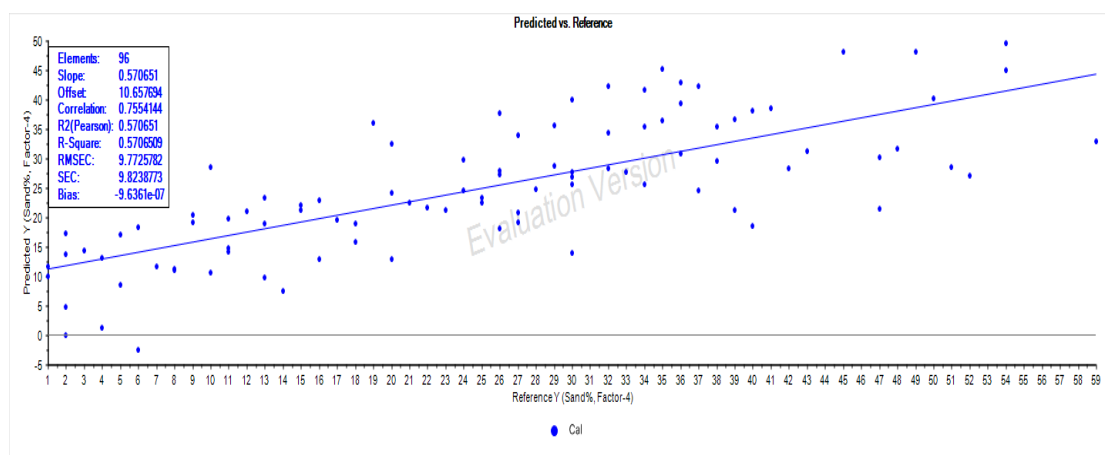
مطلوب ترین مدل های ابرطیفی برآوردکننده مقادیر شن استان مازندران، شناخته شدند (شکل های ۵ و ۶). مشخصات مدل برآوردکننده نهایی مقادیر شن استان مازندران و نیز نتایج آماری مدل (عملیات اعتبارسنجی متقاطع)، در شکل ۶، گردآوری شده است. کیفیت و صحت مدل نهایی واسنجی شده تخمین مقادیر شن در





شکل ۵- عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی PLS، تراکم (لحظه‌ای) واریانس طیفی و مقادیر شن در فاکتورهای: الف) اول و دوم؛ ب) سوم و چهارم؛ پ) واریانس توصیفی تجمعی مقادیر شن بر اساس ۷ مؤلفه منتخب؛ ت) واریانس توصیفی تجمعی مقادیر طیفی بر اساس ۷ فاکتور؛ ث، ج) واریانس مقادیر باقی‌مانده در متغیرهای وابسته و مستقل بر اساس فاکتورهای منتخب؛ ج) واریانس توصیفی طیفی کل (به تفکیک تعداد متغیرهای مستقل؛ ح، خ) نمودار تأثیر (نفوذ) بر اساس رابطه بین واریانس متغیرهای وابسته، مستقل و مقادیر لوریج تعدیل شده نمونه‌ها بر اساس مدل‌های ۲ و ۴ مؤلفه‌ای؛ د) مقایسه مقادیر مرجع و تخمینی در نمونه‌های ست و اسنجی؛ مشخص‌سازی محدوده‌های طیفی مهم در واسنجی مدل شن بر اساس ۲ فاکتور؛ ذ) ضرایب وزنی رگرسیونی (B_w)؛ ر) نسبت مقادیر تخمینی به مقادیر باقیمانده متغیرهای وابسته بر اساس ۴ فاکتور؛ ز) ضرایب رگرسیونی ساده (B_0) بر مبنای ۴ فاکتور اول؛ ژ) بقایای متغیرهای مستقل بر اساس نمونه‌ها در حالت ۴ مؤلفه‌ای؛ س) نمودار ماتریسی روابط بین نمونه‌ها با بقایای متغیرهای طیفی (تخمین‌گر) در حالت ۴ مؤلفه‌ای.

Figure 5. PLS algorithm in brief: the instant density of spectral variance and sand contents: A) at the 1st and 2nd factors; B) at the 3^d and 4th factors; C) the sand cumulative descriptive variance based on the 7 selected PCs; D) the spectral cumulative descriptive variance based on the 7 PCs; E&F) the residuals variance of the sand & spectral bands based on the LVs; G) the total spectral descriptive variance by the spectral variables; H&I) the influence chart (impact) based on the sand, spectra and the sample adjusted leverage by the 2-factors & the 4-factors models; J) Comparison of predicted and reference values in calibration sample set; K&M) Characterization of spectral ranges in the calibration of sand model by 2&4 factors (regression beta coefficients); L) the predicted values vs residuals of the sand variable on 4 LVs; N) the predictor variable residuals based on the 4 PCs; O) the matrix plot of relationships between the samples and predictors in 4 PCs.



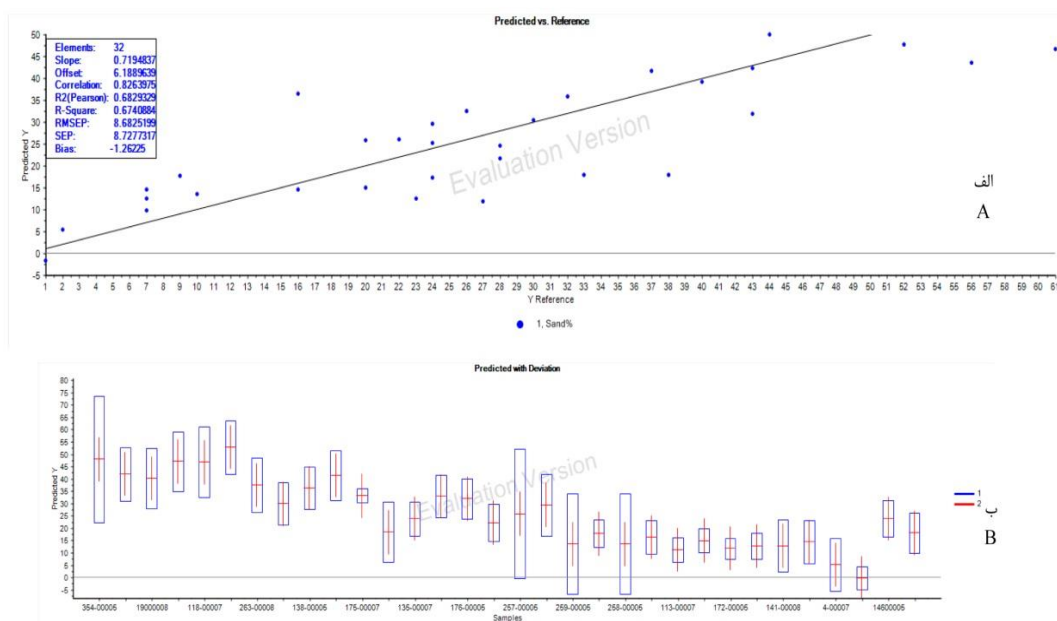
شکل ۶- مدل تخمین گر نهایی شن بر اساس ست واسنجی: مقادیر تخمینی و مرجع پارامتر شن، بر اساس مدل دارای ۴ بردار پنهان.

Figure 6. The final predicting model of sand contents, the predicted vs reference values based on 4 LVs.

صحت سنجی و ارزیابی کیفیت مدل تخمین گر، با استفاده از ۳۲ نمونه مستقل اعتبارسنجی، انجام شد. براساس مدل ابرطیفی PLS به دست آمده از ست کالیبراسیون (شکل های ۵ و ۶)؛ مقادیر شن منطقه براساس داده های طیفی ۳۲ نمونه مستقل، سنجیده و سپس با مقادیر مرجع آن در آزمایشگاه، مقایسه شد. در نهایت، مقادیر شن نمونه های مستقل مجموعه اعتبارسنجی، با دقت خوبی برآورد شدند. شکل ۷، بیانگر مقادیر تخمین زده شده در مقایسه با مقادیر مرجع در زیرمجموعه اعتبارسنجی می باشد، که براساس $LV=2$ و $LV=4$ محاسبه شده است (شکل ۷-الف). هم چنین نمودار مقادیر تخمین شده در دامنه انحراف معیار آن ها، نیز بر اساس ۲ و ۴ مؤلفه، ترسیم و محاسبه گردید (شکل ۷-ب). نتایج حاصل از عملیات صحت سنجی بر اساس $LF=2$ ، بدین ترتیب بوده است: $R_p: 0.83$ ، $R^2_p: 0.68$ ، $RMSEP: 0.68$ ؛

$SE_p: 0.72$ و $bias: -0.26$ (شکل ۷ و جدول ۴).
 براساس $LF=4$ نیز بدین ترتیب بوده است: $R_p: 0.82$ ، $R^2_p: 0.67$ ، $RMSEP: 0.63$ و $SE_p: 0.92$ و نیز $bias: -0.93$ (شکل ۷ و جدول ۴). به همین ترتیب مقادیر لوریج بر اساس تست لوریج تعدیل شده، برای مؤلفه های دوم و چهارم به ترتیب شکل ۸، محاسبه گردید. پارامترهای کیفیت، صحت و قدرت مدل، براساس ست اعتبارسنجی مستقل، بدین ترتیب محاسبه گردید: $LV=2$ ، مقادیر RPD_p و $RPIQ_p$ به ترتیب: 1.78 و 2.45 و نیز $LV=4$ به ترتیب: 1.75 و 2.41 . براساس طبقه بندی کلی کیفیت مدل، در صورتی که مقدار RPD و $RPIQ$ ، بیش از ۲ باشد، برآورد بسیار دقیق است، اگر بین ۲- $1/4$ باشد، برآورد خوب است و اگر کم تر از $1/4$ باشد، بیانگر عدم توانایی مدل می باشد (۷، ۱۰).

صحت سنجی و ارزیابی کیفیت مدل تخمین گر، با استفاده از ۳۲ نمونه مستقل اعتبارسنجی، انجام شد. براساس مدل ابرطیفی PLS به دست آمده از ست کالیبراسیون (شکل های ۵ و ۶)؛ مقادیر شن منطقه براساس داده های طیفی ۳۲ نمونه مستقل، سنجیده و سپس با مقادیر مرجع آن در آزمایشگاه، مقایسه شد. در نهایت، مقادیر شن نمونه های مستقل مجموعه اعتبارسنجی، با دقت خوبی برآورد شدند. شکل ۷، بیانگر مقادیر تخمین زده شده در مقایسه با مقادیر مرجع در زیرمجموعه اعتبارسنجی می باشد، که براساس $LV=2$ و $LV=4$ محاسبه شده است (شکل ۷-الف). هم چنین نمودار مقادیر تخمین شده در دامنه انحراف معیار آن ها، نیز بر اساس ۲ و ۴ مؤلفه، ترسیم و محاسبه گردید (شکل ۷-ب). نتایج حاصل از عملیات صحت سنجی بر اساس $LF=2$ ، بدین ترتیب بوده است: $R_p: 0.83$ ، $R^2_p: 0.68$ ، $RMSEP: 0.68$ ؛



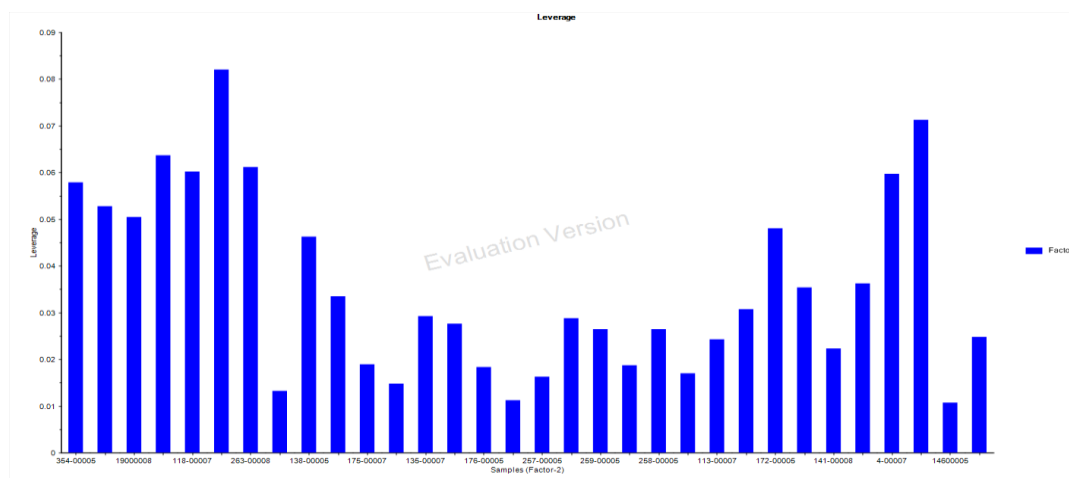
شکل ۷- الف) نمودار مقادیر تخمین زده شده در مقایسه با مرجع توسط مدل نهایی ابرطیفی شن، در زیرمجموعه نمونه‌های مستقل مجزا؛ ب) نمودار مقادیر تخمینی شن به‌همراه انحراف معیار در نمونه‌های مستقل مجزا.

Figure 7. A) The graphs of the predicted vs the reference values by the final sand hyperspectral model in the separate standalone subset; B) The graphs of the predicted sand values with deviation in the separate standalone subset.

جدول ۴- خروجی مدل: پارامترهای آماری عملیات صحت‌سنجی مدل شن منطقه با استفاده از نمونه‌های مستقل.

Table 4. Model output: Statistical parameters of the sand validation process using independent samples.

Prediction di	RMSEP	SEP	Bias	Slope	Offset	Correlation	SEPCorr	ICM_Slope	ICM_Offset
Sand%	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factor-1	8.9425	8.9656	-1.4482	0.6939	6.6836	0.8153	8.9485	0.9579	2.5061
Factor-2	8.6825	8.7277	-1.2623	0.7195	6.1890	0.8264	8.7009	0.9492	2.5475
Factor-3	8.6520	8.7785	-0.4496	0.7510	6.1646	0.8269	8.6884	0.9106	2.7844
Factor-4	8.8327	8.9245	-0.9272	0.7346	6.1223	0.8199	8.8467	0.9151	3.1042



شکل ۸- مقادیر لوریج حسابی بر اساس نمونه‌های زیرمجموعه اعتبارسنجی در عملیات صحت‌سنجی مدل ابرطیفی شن.

Figure 8. The calculative/adjusted leverage values on the basis of validation samples in accuracy assessment of the predictive model.

طی پژوهش حاضر؛ بر اساس مدل ابرطیفی شن، در زیرمجموعه داده‌های کالیبراسیون شامل ۹۶ نمونه، و نیز اعتبارسنجی آن بر اساس ۳۲ نمونه مستقل مجزا، مشخص شد که از بین حداکثر ۷ متغیر پنهان، دو و چهار مؤلفه اول می‌توانند بهترین تخمین را در خاک‌های استان ارائه دهد. بنابراین، فرآیند واسنجی مدل شن بر مبنای ۴ فاکتور نخست، و روش اعتبارسنجی متقاطع کامل با متد حذف تکی (FLOOCV)، انجام شد. زیرا ۴ فاکتور نخست قادرند بیش از ۶۰٪ واریانس اطلاعات متغیرهای شن و بیش از ۹۸٪ واریانس اطلاعاتی متغیرهای طیفی را در خود متمرکز سازند. ضرایب همبستگی مقادیر شن با دامنه‌های طیفی مؤثر، نیز بدین ترتیب محاسبه شدند: UV: باندها ۳۹۰:۴۶۰؛ Vis: باندهای ۵۱۰ الی ۵۴۰؛ ۰/۵۳، ۶۸۰ الی ۶۹۰؛ NIR: ۹۵۰ الی ۹۷۰؛ ۰/۶۷ و نیز باندهای ۱۱۰۰:۰/۷۰؛ SWIR: ۱۴۱۰:۰/۷۶، ۱۸۶۰ الی ۱۹۰۰؛ ۰/۷۶، ۲۱۸۰ الی ۲۲۲۰؛ ۰/۷۷ که این باندهای طیفی تعیین شده، با بیش‌ترین مقادیر همبستگی ($R(CC_{max})$)، بیانگر نفوذ و تأثیر بالای آن‌ها به‌عنوان متغیرهای تخمین‌گر، در فرآیند مدلینگ ابرطیفی پارامتر شن در استان مازندران، بوده‌اند. بنابراین، محدوده‌های طیفی مؤثر در فرآیند مدلینگ شن، بر اساس تست عدم قطعیت مارتن و ضرایب بتا (نتایج مدل‌سازی و تحلیل رفتارهای ابرطیفی بر مبنای الگوریتم PLSR) در کل دامنه طیف، نیز بدین‌صورت تعیین شدند: محدوده بازتابی فرابنفش: ۳۹۰؛ مرئی: ۴۴۰ الی ۵۴۰؛ مادون قرمز نزدیک: ۷۴۰ الی ۹۹۰؛ مادون قرمز موج‌کوتاه: ۱۴۳۰ الی ۱۸۹۰، ۱۹۳۰، ۲۱۹۰ الی ۲۲۴۰، ۲۳۳۰ الی ۲۴۴۰ نانومتر، که این نتایج تاحد زیادی منطبق بر نتایج به‌دست آمده توسط کاسا و همکاران (۲۰۱۳) بر مبنای سنجنده‌های ابرطیفی هوایی MIVIS و نیز داده‌های

پژوهش حاضر، که بر مبنای طیف‌سنجی بازتابی آزمایشگاهی و عملیات پیشرفته تحلیل طیفی-آماری استوار است، به دلیل بهره بردن از کل علائم طیفی و نه فقط یک یا چند پدیده طیفی خاص (هم‌چون روش حذف پیوستار CR)، سبب تقویت هرچه بیشتر مدل‌های ابرطیفی شده است. همان‌طور در برخی پژوهش‌های ذکرشده، پدیده‌های جذبی غالب (DAFs) در حدود ۱۴۰۰ (CR₁₄₀₀) و ۱۹۰۰ (CR₁₉₀₀) نانومتر، به‌طورکلی به حضور آب کریستالی و هیدراته، مربوط می‌شود. بعلاوه، از آنجایی‌که CR₁₄₀₀ به ارتعاشات گروه OH- سیلیکات‌ها مربوط می‌شود، بنابراین براساس این‌گونه پدیده‌های جذبی؛ به‌طور غیرمستقیم نیز می‌توان به بررسی اجزای شن، پرداخت (۹). هم‌چنین، براساس برخی مطالعات در دامنه طیفی NIR، پدیده‌های بسیار بارز و مشهودی، در قالب پیک‌های جذبی مرتبط با پیوندهای خمشی و کششی گروه هیدروکسیل آب آزاد، در اطراف ۱۴۰۰، ۱۹۵۰، و نیز گروه‌های هیدروکسیل و آب موجود در شبکه مینرالی، در ۲۲۰۰ نانومتر، رخ می‌دهند (۱۰ و ۳۳)، که در پژوهش حاضر نیز مشهود بوده است. اندک پژوهش‌های انجام شده هم‌چون پنگ و همکاران (۲۰۲۰)، دانش و همکاران (۲۰۱۶)، تأییدکننده آن است که دامنه‌های بازتابی مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج‌کوتاه، بالاخص طول‌موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر، در تخمین اجزای بافت خاک، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند، که نتایج پژوهش حاضر نیز بر آن، صحه می‌گذارد (۱۰ و ۲۷). به‌علاوه، پیک‌های جذبی بارز در محدوده مرئی (۴۶۰، ۵۴۰ و ۶۵۰ نانومتر)، برای تخمین مقادیر شن، نقش مهمی ایفا می‌کنند. این درحالیست که؛ پیک‌های تداخلی و مزاحم نیز در باندهای زیر ۴۵۰ و باندهای بیش از ۶۷۰ نیز رخ داده و باید به آن‌ها توجه کرد.

تقدیر و تشکر

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

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های مقاله حاضر از طرح پژوهشی و رساله دکتری حفاظت خاک در دانشگاه تربیت مدرس، استخراج شده است. پژوهش حاضر در دو نوبت در تابستان سال‌های ۹۳ الی ۹۵ و نیز تصحیح و تقویت عملیات مدلینگ و آپدیت داده‌ها (۹۶ الی ۹۹) به انجام رسیده است.

تعارض منافع

در مقاله حاضر، تعارض منافع وجود نداشته و مورد تأیید نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول؛ مسئول نمونه‌برداری، مجری پژوهش، متدولوژیست و عملیات مدلینگ و تحلیل‌کننده مدل بوده است. نویسنده دوم؛ به‌عنوان استاد ناظر طرح، مسئول عملیات صحت‌سنجی و نیز تهیه آزمایشگاه طیف‌سنجی بوده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

پژوهش حاضر در قالب طرح پژوهشی و رساله دکتری حفاظت خاک، تحت حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس، انجام شده است.

ابریطی فضایی CHRIS-PROBA، بوده است (۵). هم‌چنین کیفیت مدل ابریطی بر اساس شاخص‌های RPD و RPIQ، نشان‌دهنده قدرت تخمین مناسب اجزای شن در استان مازندران بوده است. البته، حضور عوامل مؤثر و مزاحم بر بازتاب‌های طیفی، به دلیل عدم حذف و در شرایط نسبتاً طبیعی خاک، سبب کاهش قدرت مدل (معیارهای تشخیص کیفیت مدل) گردیده است، که به نوعی در راستای هدف پژوهش، بر مبنای تکنیک مجاورت‌سنجی در شرایط طبیعی، می‌باشد. هم‌چنین، در بررسی خصوصیات خاک با استفاده از تکنیک دورسنجی، نیز اینگونه خطاها، به دلیل دور بودن سنجنده از سطح خاک (بیش از ۷۰۰ کیلومتر) و نیز خطاهای اتمسفر، سنجنده، متغیرهای خاک و ...، بسیار بیش‌تر و بارزتر بوده و پژوهش حاضر نیز در راستای فرآیند بیش‌مقیاس‌سازی بر مبنای دورسنجی بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این مهم که اجزای شن، دارای اهمیت ویژه‌ای در بسیاری از پروژه‌های مدیریت و حفاظت خاک است و نیز، امروزه، نسل جدیدی از دورسنجنده‌های ابریطی با قدرت تفکیک طیفی بالا، می‌توانند عملیات پایش و سنجش را انجام دهند، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند نقطه آغازی برای پهنه‌بندی دقیق اجزای شن بافت خاک، با استفاده از سکوه‌های دورسنجی، بر مبنای داده‌های ابریطی باشد. هم‌چنین، با استفاده از تحلیل ابریطی، امکان تعیین و آشکارسازی طول‌موج‌های کلیدی این جزء مهم خاک، فراهم می‌شود. بنابراین، از طول‌موج‌های کلیدی به‌دست‌آمده، می‌توان برای عملیات بیش‌مقیاس‌سازی و نیز ساخت و یا کالیبره کردن سنجنده‌های ابریطی هوآرد یا ماهواره‌ای، بهره برد.

منابع

1. Adeline, K.R.M., Gomez, C., Gorretta, N., and Roger, J.M. 2017. Predictive ability of soil properties to spectral degradation from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. *Geoderma*. 288: 143-153.
2. Askari, M.S., Cui, J., O'Rourke, S.M., and Holden, N.M. 2015. Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra. *Soil and Tillage Research*. 146: 108-117.
3. 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.
4. 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 n.106), Instituto Agrônômico (IAC), Campinas. 77p.
5. 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.
6. Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Rossel, R.A.V., and Demattê, J.A.M. 2013. Quantitative soil spectroscopy. *Appl. Environ. Soil Sci.* 3: 1-3.
7. Chang, C.W., and Laird, D.A. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N, *Soil Science*. 167: 110-116.
8. Conforti, M., Buttafuoco, G., Leone, A.P., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G., and Scarciglia, F. 2013. Studying the relationship between water-induced soil erosion and soil organic matter using Vis-NIR spectroscopy and geomorphological analysis: A case study in southern Italy. *Catena*. 110: 44-58.
9. Curcio, D., Ciralo, G., D'Asaro, F., and Minacapilli, M. 2013. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. *Procedia Environmental Sciences*. 19: 494-503.
10. 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)
11. Demattê, J.A.M., and Terra, F.S. 2014. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations, *Geoderma*. 217-218: 190-200.
12. 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 Sens.* 12: 14. 22-34.
13. Ge, Y., Thomasson, J.A., and Morgan, C.L.S. 2014. Mid-infrared attenuated total reflectance spectroscopy for soil carbon and particle size determination. *Geoderma*. 213: 57-63.
14. Gomez, C., Lagacherie, P., and Coulouma, G. 2008. Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*. 148: 141-148.
15. Gomez, C., Le Bissonnais, Y., Annabi, M., Bahri, H., and Raclot, D. 2013. Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. *Geoderma*. 209-210: 86-97.
16. 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.
17. Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Jones, M., and Thomas, M. 2012. Investigations into soil composition and texture using infrared spectroscopy. *Appl. Environ. Soil Sci.* 12p.
18. Kagan, T.P., Shachak, M., Zaady, E., and Karnieli, A. 2014. A spectral soil quality index (SSQI) for characterizing soil function in areas of changed land use. *Geoderma*. 230-231: 171-184.

19. Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Netto, J.M., and Robbez-Masson, J.M. 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*. 112: 825-835.
20. Li, D., Durand, M., and Margulis, S.A. 2012. Potential for hydrologic characterization of deep mountain snowpack via passive microwave remote sensing in the Kern River basin, Sierra Nevada, USA. *Remote Sens. Environ*. 125: 34-48.
21. 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.
22. McDowell, M.L., Bruland, G.L., Deenik, J.L., Grunwald, S., and Knox, N.M. 2012. Soil total carbon analysis in Hawaiian soils with visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy, *Geoderma*. 189-190: 312-320.
23. Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., and Mayr, T.R. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping - A review. *Geoderma*. 162: 1-19.
24. 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 CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*. 314: 102-112.
25. Padarian, J., Minasny, B., and McBratney, A.B. 2019. Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data. *Geoderma Regional*. 16: e00198.
26. 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.
27. 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 and Tillage Research*. 184: 45-51.
28. Rawlins, B.G., Kemp, S.J., and Milodowski, A.E. 2011. Relationships between particle size distribution and VNIR reflectance spectra are weaker for soils formed from bedrock compared to transported parent materials. *Geoderma*. 166: 84-91.
29. Sawut, M., Ghulam, A., Tiyyip, T., Zhang, Y.J., Ding, J.L., Zhang, F., and Maimaitiyiming, M. 2014. Estimating soil sand content using thermal infrared spectra in arid lands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 33: 203-210.
30. Stevens, A., Nocita, M., Toth, G., Montanarella, L., and van-Wesemael, B. 2013. Prediction of soil organic carbon at the European scale by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *PLoS ONE*. 8: 6. e66409. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0066409>.
31. Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B., and Chittleborough, D. 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*. 11: 123-131.
32. Vašát, R., Kodešová, R., Borůvka, L., Klement, A., Jakšík, O., and Gholizadeh, A. 2014. Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS), *Geoderma*. 232-234: 208-218.
33. Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., and Skjemstad, J.O. 2006. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*. 131: 59-75.
34. Xian-Li, X., Xian-Zhang, P., and Bo, S. 2012. Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for Prediction

- of Soil Properties near a Copper Smelter. *Pedosphere*. 22: 3. 351-366.
35. 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.
36. 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.
37. 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.

