



بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS)

مجید دانش^۱، حسینعلی بهرامی^{۲*}، روشنک درویش‌زاده^۳، علی‌اکبر نوروزی^۴

۱. دانشجوی دکتری فیزیک، حفاظت و فرسایش خاک، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشیار فیزیک، حفاظت و فرسایش خاک، دانشگاه تربیت مدرس
۳. استادیار سنجش از دور و علوم اطلاعات زمین، دانشگاه توننته، هلند
۴. استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۷/۲۷

چکیده

بخش رس از مهم‌ترین اجزای بافت خاک است که در عملیات مدل‌سازی زیست‌محیطی^۱ و پهنه‌بندی رقومی خاک^۲ بسیار مورد توجه است. از آنجاکه این ویژگی از تغییرپذیری‌های مکانی^۳ تأثیر می‌پذیرد، تشخیص و پهنه‌بندی و پایش این پارامتر، در مقیاس وسیع و با روش‌های نمونه‌برداری سنتی و تحلیل آزمایشگاهی معمول، بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است. بنابراین، تقاضا برای بررسی این‌گونه اطلاعات با کیفیت خوب، هزینه کم و قدرت تفکیک (مکانی) مناسب، در مباحث و زمینه‌هایی همچون کشاورزی دقیق^۴ (PA) و برنامه‌ریزی اراضی^۵ (LP) بسیار زیاد شده است. با ظهور طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS) که براساس ارتعاشات بنیادین^۶ (FVs)، علائم ترکیبی^۷ و فرعی^۸ حاصل از گروه‌های عاملی^۹ به تشخیص و بررسی اجزای خاک می‌پردازد، روزنه‌ای در بررسی این پارامتر خاک ایجاد کرده است. طی تحقیق حاضر، از طیف‌سنجی بازتابی مجاورتی^{۱۰} (PSS) برای بررسی مقادیر رس در قسمت‌هایی از استان مازندران استفاده شده است. بدین ترتیب، مجموع ۱۲۸ نمونه از عمق ۲۰ سانتیمتری سطح خاک و براساس روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده تصادفی^{۱۱} (SRS) و نیز با کمک اطلاعات جانبی همچون: زمین‌شناسی، کاربری اراضی، نقشه راه‌ها، و خاک‌شناسی استان جمع‌آوری شد. در ابتدا، مجموع نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شد: ۹۶ نمونه برای ایجاد مدل (عملیات واسنجی^{۱۲}) و ۳۲ نمونه برای اعتبارسنجی مستقل^{۱۳} آن. با بهره‌گیری از تحلیل رگرسیون چندمتغیره^{۱۴} PLSR و براساس تکنیک اعتبارسنجی متقاطع به روش حذف تکی^{۱۵} (LOOCV) و عملیات پیش‌پردازشی^{۱۶} چون: میانگین‌گیری^{۱۷} (روش کاهش داده‌های ابرطیفی^{۱۸})، هموارسازی و مشتق اول طیفی براساس الگوریتم ساویتسکی-گولای^{۱۹}، در نهایت مدل کالیبراسیون با چهار فاکتور^{۲۰} (LFs)، با $RMSE_C$ حدود ۹/۵۵ و R^2_C حدود ۰/۷۳ و نیز RPD_C تقریبی ۱/۹۴ و $RPIQC$ تقریبی ۳/۱۹ (ست کالیبراسیون)، به‌منزله مطلوب‌ترین مدل جهت برآورد مقادیر رس منطقه مورد مطالعه، شناخته شد که نتایج حاکی از توانایی مناسب مدل در برآورد رس منطقه بوده است. در نهایت، قابلیت فن‌آوری طیف‌سنجی بازتابی پراکنشی مرئی-فروسرخ نزدیک^{۲۱} (VNIR-DRS)، در بررسی اجزای رسی منطقه، به اثبات رسید. همچنین، می‌شود این مدل و نیز دامنه‌های طیفی مؤثر به‌دست‌آمده را جهت بررسی مقادیر رس در مقیاس بسیار وسیع، با عملیات بیش‌مقیاس‌سازی^{۲۲} به‌وسیله داده‌های ابرطیفی هوایی-ماهواره‌ای، مبنای قرار داد. این امر نشان‌دهنده اهمیت ابرطیف‌سنجی آزمایشگاهی، همچون پایه‌ای برای تشخیص باندهای طیفی مفید و نیز ایجاد مدل جهت استفاده آن در دورسنجی ابرطیفی است.

کلیدواژه‌ها: اعتبارسنجی متقاطع، پهنه‌بندی رقومی، دورسنجی ابرطیفی، ابرطیف‌سنجی آزمایشگاهی، رس، PLSR.

- | | |
|---|--|
| 1. Laboratory Diffuse Reflectance Spectroscopy (LDRS) / Lab Hyperspectroscopy | 2. environmental modeling |
| 3. Digital Soil Mapping (DSM) | 4. spatial variabilities |
| 5. Precision Agriculture | 6. Landscape Planning |
| 7. Fundamental Vibrations (FVs) | 8. combinations |
| 9. overtones | 10. functional groups |
| 11. Proximal Soil Sensing/Proximal Reflectance Spectroscopy | 12. Stratified Randomized Sampling method |
| 13. calibration process | 14. validation process (stand-alone validation process) |
| 15. Partial Least Square Regression technique | 16. Leave-One-Out Cross-Validation method |
| 17. pre-processing operations | 18. spectral averaging |
| 19. spectral dimensionality reduction | 20. Savitzky-Golay spectral smoothing & 1 st derivative algorithm |
| 21. Latent Factors | 22. Visible-Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy |
| 23. upscaling process | |

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه خاک‌شناسی. تلفن: ۰۹۱۲۱۳۰۷۳۶۴

۱- مقدمه

که تشخیص، پهنه‌بندی و پایش^{۱۵} آنها با روش‌های نمونه‌برداری سنتی و تحلیل آزمایشگاهی معمول^{۱۶} بسیار هزینه‌بر و گران است (Quan et al., 2013). البته بررسی‌های سنتی خاک و تحلیل آزمایشگاهی فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های خاک^{۱۷} روش معمول توسعه فهم و درک ما از خاک است که این روش‌ها غالباً وقت‌گیر و پرهزینه‌اند و نیز، نمونه‌های بسیاری از آنها مورد نیاز است (Viscarra Rossel et al., 2010). بنابراین، تقاضا برای دستیابی به اطلاعات خاک با کیفیت خوب، هزینه کم، و قدرت تفکیک (مکانی) مناسب در مباحث و زمینه‌هایی همچون کشاورزی دقیق (PA) و برنامه‌ریزی اراضی (LP) بسیار زیاد شده است. در نتیجه، توسعه روش‌هایی که برای تحلیل و بررسی خاک و جمع‌آوری اطلاعات آن از هر نظر به صرفه باشد، به اولویت تبدیل شده است (Zhu et al., 2011). با این حساب، آگاهی از خصوصیات گوناگون خاک و نحوه توزیع مکانی آن بسیار اهمیت دارد (Conforti et al., 2013) و تصمیم‌گیری‌های مکان‌مبنای^{۱۸} در عملیات مدیریتی بر پایه این ویژگی‌های خاک خواهد بود (Huang et al., 2007). خاک ترکیب پیچیده‌ای از اجزای گوناگون است که خصوصیات ذاتی طیفی^{۱۹} اجزای تشکیل‌دهنده آن و نحوه کنار هم قرار گرفتن آنها در ماتریکس خاک سبب تأثیر در بازتاب طیفی خاک می‌شود (Wang et al., 2012).

بافت خاک^۱ مهم‌ترین متغیر محیطی است زیرا در تنزل اراضی^۲ و فرایندهای انتقال آب، کنترل کیفیت خاک و حاصلخیزی آن نقش بسیار مهمی دارد (Hillel, 1980). همچنین، در بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و نیز رفتارهایی همچون ظرفیت نگهداری آب (WHC)^۳ و عناصر غذایی خاک، هدایت هیدرولیکی (HC)^۴، شکنندگی خاک و مقاومت خاک به عملیات کاشت نیز اثرگذار است (Greve et al., 2012). از سویی، اطلاعات توزیع مکانی^۵ و تغییرپذیری اجزای گوناگون بافت خاک (همچون رس) را، به‌منزله پارامتر ورودی به مدل‌های اکولوژیکی، هیدرولیکی، اقلیمی و دیگر مدل‌های زیست‌محیطی، به‌طور فزاینده‌ای نیاز داریم. همچنین، نیاز مبرمی برای تعیین و تخمین دقیق روابط بین هریک از اجزای بافت خاک با پارامترهای کلیدی زیست‌محیطی^۶ (همچون اقلیم، توپوگرافی، مواد مادری، و ...) جهت بهبود مدیریت پایدار، اقتصادی، و مکانی^۷ احساس می‌شود (Greve et al., 2012). از دیگر سو، این پارامتر (اجزای بافت خاک)، پایه و بنیان مدل‌های تخمین‌زننده محیطی^۸ و نقشه‌بندی رقومی خاک^۹ است (Hartemink and Minasny, 2014). افزون بر آن، اجزای بافت بر پایداری خاک‌دانه‌ها^{۱۰} (Hillel, 2004) و نیز تشکیل سله و پوسته سطحی خاک^{۱۱} اثرگذار است (Bresson et al., 2006) و در کیفیت خاک تأثیر بسزایی دارد، به‌طوری‌که نقش بارز رس و مینرالوژی اجزای آن در مدیریت ماده آلی خاک (SOM)^{۱۲}، به اثبات رسیده است. بدین ترتیب که تثبیت ماده آلی خاک^{۱۳} با اندازه ذرات خاک و مینرالوژی اجزای آن ارتباط قوی و نزدیک دارد (Jindaluang et al., 2013). نقش اندازه ذرات (اجزای بافت خاک) در درجه تجزیه و تثبیت مواد آلی بدین ترتیب است که با افزایش اندازه ذرات، فعالیت‌های تجزیه و تثبیت مواد آلی کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین اثر بر مواد آلی خاک از آن اجزای رسی است (Baldock and Skjemstad, 2000). از سویی، خاک‌ها مستعد تغییرپذیری زمانی و مکانی^{۱۴} معنی‌داری‌اند

1. soil texture
2. land degradation
3. Water Holding Capacity
4. Hydraulic Conductivity
5. spatial distribution/changeability
6. environmental key parameters
7. sustainable/economical /spatial management
8. predictive environmental models
9. Digital Soil Mapping
10. aggregate resistance
11. sealing & crusting
12. Soil Organic Matter management
13. SOM fixation
14. temporal & spatial changeability
15. monitoring/mapping /recognizing
16. Commonplace Lab analysis
17. lab physicochemical analysis of soil samples
18. site-specific decision
19. inherent spectral properties

تداخلات متفاوت پس‌زمینه^{۱۲}، تغییرات مسیری جو^{۱۳} (Xu et al., 2011) و نیز توپوگرافی سطح زمین، ارتفاع خورشید و شرایط متغیر سطح خاک، که در انعکاس طیفی خاک تأثیرگذارند (Shrestha et al., 2005)، غالباً با خطاهایی در داده‌های طیفی همراه‌اند. بنابراین، گرایش به استفاده از سنجنده‌های (ابرطیفی) زمینی^{۱۴}، جهت پایش خصوصیات خاک (به‌منزلهٔ مبنایی برای این کار) بیشتر شده است. سنجنده‌های مجاورتی و یا زمینی خاک^{۱۵} بالقوه قادرند داده‌های با قدرت تفکیک طیفی مناسب را پیوسته و سریع جمع‌آوری کنند و به‌صورت زمان‌حقیقی^{۱۶} آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل کنند که گاه ممکن است برابر با چند ثانیه باشد (Kuang et al., 2012). تحلیل خاک بر مبنای این نوع سنجنده‌ها (طیف‌سنجی زمینی - مجاورتی)، به‌نسبت روش‌های آزمایشگاهی سنتی و قدیمی، مزایای گوناگونی دارد، یعنی کارآمدتر است، نتایج آن بهنگام و دقیق‌تر است و امکان جمع‌آوری داده‌ها با سرعت زیاد وجود دارد و حتی دریافت داده‌های ابرطیفی، در حال عبور از مزرعه (سیار) میسر است (Kuang et al., 2012).

وقوع ارتعاشات مولکولی بنیادین اجزای خاک^{۱۷} در دامنهٔ فرسوخ میانی (MIR) سبب ایجاد علائم فرعی و ترکیبی^{۱۸} در محدودهٔ فرسوخ نزدیک-موج کوتاه (NIR-SWIR) و برانگیختگی‌های الکترونی^{۱۹} در

1. soil spectral behavior
2. Spaceborne/Airborne/Lab spectroscopy
3. Digital Soil Mapping
4. terrestrial remote sensing
5. spectral reflectance remote sensing technology
6. Electromagnetic Energy
7. nondestructive
8. broadband sensor
9. Diagnostic Spectral Features
10. Spectral Absorption Bands
11. mapping process
12. background spectral tortuosity
13. atmospheric path variation
14. ground-based hyperspectral sensor
15. soil ground-based/proximal sensors
16. real time
17. fundamental molecular vibration of soil components
18. overtone and combination signatures
19. electronic excitements

براساس رفتارهای طیفی خاک^۱ و به‌دنبال توسعهٔ علوم مرتبط با دورسنجی، همچون زمین‌آمار، پیشرفت‌های چشمگیری در روش‌های سنجش پارامترهای خاک (همچون هوابرد، فضابرد (ماهواره‌ای) و طیف‌سنجی زمینی و غیره)^۲ ایجاد شده که چه‌بسا به‌وسیلهٔ متدهای جدیدی، همچون په‌نه‌بندی رقومی خاک (DSM)^۳، به‌کار روند (McBratney et al., 2003). از اهداف اصلی دورسنجی کرهٔ خاکی^۴، استخراج اطلاعات از سطح آن بوده است که بیشترین بخش این دانش صرف شناخت و درک بهتر رابطهٔ بازتاب طیفی از سطوح خاک‌های گوناگون شده است (Bachmann et al., 2014). فناوری دورسنجی بازتابی^۵ که از انرژی الکترومغناطیس (EME)^۶ بازتابی از اجسام جهت به‌دست آوردن اطلاعات سطح زمین بهره می‌برد (Khorram et al., 2012)، طی دههٔ گذشته ابزاری سودمند در پایش کیفیت خاک و مسائل زیست‌محیطی بوده است و وامدار قابلیت‌هایی همچون سریع بودن، به‌صرفه بودن و غیرتخریبی^۷ بودن این فناوری است (Li et al., 2012). اگرچه داده‌های سنجنده‌های په‌نه‌بند^۸ همچون SPOT-HRV، Landsat-MSS و Landsat-TM، نیز برای په‌نه‌بندی خاک به‌کار می‌روند، امکان آن را ندارند که اطلاعات کافی و دقیقی برای متمایزسازی خاک‌ها فراهم کنند زیرا په‌نه‌بند ۱۰۰-۲۰۰ نانومتری آن‌ها نمی‌تواند پدیده‌های طیفی تشخیصی (DSFs)^۹ اجسام زمینی را با دقت و قدرت تفکیک (طیفی) مناسب (FWHM<15nm) آشکارسازی بررسی کند (Shrestha et al., 2005). با توسعهٔ سیستم سنجنده‌های ابرطیفی که داده‌ها را در باندهای باریک، فراوان و پیوسته دریافت می‌کنند، امکان استفاده از بازتاب‌های سطح زمین به‌طور پیوسته و با تفکیک طیفی خوب (کمتر از ۱۵ نانومتر) مهیا شده است که نه‌تنها سبب تولید طیف‌های مشابه آزمایشگاه طیف‌سنجی (LS) به‌همراه باندهای جذبی ویژهٔ (SABs)^{۱۰} از خصوصیات هدف می‌شود، بلکه به افزایش دقت فرایند په‌نه‌بندی^{۱۱} با قدرت تفکیک طیفی مناسب (کمتر از ۱۵ نانومتر) نیز می‌انجامد (Shrestha et al., 2005). البته داده‌های طیفی ماهواره‌ای (ابرطیفی) نیز به‌دلیل

ایجاد کرده که اطلاعات مرتبط با پارامترهای خاک با سهولت بیشتر و به‌طور کارآمد از طیف‌های VNIRS استخراج و استنتاج شوند (Ge et al., 2014).

۲- فناوری طیف‌سنجی پراکنشی مرئی-فروسرخ نزدیک آزمایشگاهی (VNIR-DRS)^{۱۷}، پایه و

اساس دورسنجی ابرطیفی

برای تولید طیف خاک^{۱۸}، پرتو تابشی، شامل همه فرکانس‌های مورد نظر در دامنه طیفی ویژه^{۱۹} (مرئی (VIS) تا فرسرخ موج‌کوتاه (SWIR)) (حدود ۲۵۰۰-۴۰۰ نانومتر)، به‌سوی نمونه تابیده می‌شود. برحسب اجزای حاضر در خاک، پرتو ورودی سبب می‌شود پیوندهای مولکولی منحصربه‌فرد^{۲۰} به دو حالت خمشی و کششی^{۲۱} مرتعش شوند و براساس کوانتوم انرژی (EQ)^{۲۲}، این پیوندها درجات گوناگونی از نور (فروودی) را جذب می‌کنند (Stenberg et al., 2010). از آنجاکه کوانتوم انرژی تحت تأثیر مستقیم فرکانس است (و یا به‌طور معکوس، به طول موج مربوط می‌شود)، طیف جذبی نتیجه‌شده^{۲۳} سبب تولید پدیده طیفی مشخصی (DSF)^{۲۴} می‌شود که چه‌بسا برای اهداف تحلیلی خاک استفاده شود (Stenberg et al., 2010). بنابراین،

1. electronic excitements
2. electromagnetic spectrum (EMS)
3. intense fundamental molecular frequencies
4. vibrational bending and stretching
5. functional groups
6. Near Infra Red/Shortwave Infra Red
7. lab spectroscopy-proximal sensing technology
8. overtones
9. overtones-combinations
10. VNIR-reflectance spectroscopy
11. optical sensitivity
12. optical outfits
13. in-situ/in-field deployment
14. minimal sample preparation
15. calculational modeling
16. multivariate tech.
17. VNIR-Diffuse Reflectance Spectroscopy
18. single soil spectrum
19. particular spectral range
20. individual molecular bonds
21. bending-stretching
22. Energy quantum
23. resultant absobed spectrum
24. Diagnostic Spectral Feature

دامنه مرئی (VIS) و برانگیختگی‌های الکترونی^۱ در دامنه مرئی (VIS) از طیف الکترومغناطیس^۲ می‌شود (Vohland et al., 2014). این بدان معناست که فرکانس‌های بنیادین مولکولی^۳ مرتبط با اجزای خاک، در دامنه طیفی MIR بین طول‌موج‌های ۲۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نانومتر رخ می‌دهند (Janik and Skjemsatd, 1995; Dunn et al., 2002; McBratney et al., 2003; Viscarra Rossel et al., 2006b). علائم ضعیف‌تر فرعی و ترکیبی حاصل از این ارتعاشات بنیادین، به‌دلیل کشش و خمش^۴ حاصل از گروه‌های عاملی^۵ همچون NH, OH و CH، به وقوع می‌پیوندد که در بخش N(SW)IR^۶ (۲۵۰۰-۷۰۰ نانومتر) غالب است و نیز، پدیده انتقال الکترونی در دامنه VIS (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) به چشم می‌خورد (Viscarra Rossel et al., 2006a). بنابراین، در دامنه طیفی مرئی، باندهای جذبی (SABs) مربوط به هر پارامتر از خاک را که در رنگ خاک اثرگذار است (به‌دلیل برانگیختگی الکترونی)، می‌شود با دورسنجی و مجاورت‌سنجی-طیف‌سنجی آزمایشگاهی^۷ استنتاج و مطالعه کرد. محدوده فرسرخ نزدیک در طیف الکترومغناطیس (NIR-EMS)، به‌دلیل حضور ارتعاشات فرعی^۸ حاصل از گروه‌های هیدروکسیل (OH) و ارتعاشات فرعی/ترکیبی^۹ حاصل از C-H+C-H، C-H+C-C و نیز مینرال‌های دارای OH⁺، و N-H، برای بررسی و مطالعه ماده آلی خاک (SOM)، رطوبت خاک، اجزای رسی، بافت، آهک و مقادیر نیتروژن خاک بسیار مناسب و مهم است (Kuang et al., 2012). بنابراین، طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ^{۱۰} (VNIRS) می‌تواند در مطالعات خاک و تعیین خصوصیات آن به‌کار رود. چندین مزیت در استفاده VNIRS وجود دارد: نخست، این سیستم حساسیت^{۱۱} بیشتری دارد، تجهیزات نوری^{۱۲} آن ارزان‌تر و بیشتر در دسترس است. دوم، در این فناوری، کاربرد درجا و درمحل^{۱۳}، امکان‌پذیر است. سوم، حداقل آماده‌سازی نمونه‌ها^{۱۴} مورد نیاز است. همچنین، با پیشرفت سریع در قابلیت‌های مدلینگ محاسباتی^{۱۵} و تکنیک‌های چندمتغیره^{۱۶}، این امکان را

صریح مقادیر رس خاک درمحل و با رطوبت‌های متفاوت و مواد مادری متفاوت است. بریکلمایر و براون^۱ (2010) از VNIRS آزمایشگاهی و سیار^۲ برای برآورد رس استفاده کردند که مشخص شد طیف‌سنجی آزمایشگاهی در برآورد رس، درمقایسه با نوع میدانی و سیار، دقت بیشتری دارد و علت آن تغییرات زیاد، ناهمگنی رطوبت و اختلاف مقیاس‌های مکانی^۳ در عملیات میدانی^۴ بوده است. البته طیف‌سنجی میدانی (FS)^۵ نیز در بررسی خصوصیات خاک بسیار مفید واقع شده است (Nocita et al., 2013) و هر دو روش میدانی و آزمایشگاهی (FS-LS)، به‌نسبت روش‌های دورسنجی هوابرد و یا فضابرد^۶، دقت بیشتری دارند زیرا به دلیل خطای اتمسفری^۷، پایین بودن نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۸، و شرایط غیرپایدار تابشی^۹ در طول پرواز (یا حرکت ماهواره) (Stevens et al., 2010)، و همچنین، تغییرات مکانی^{۱۰} در شرایط سطح خاک همچون پوشش‌های گیاهی سطح، رطوبت، ناهمگنی و زبری، سنگلاخی بودن، اندازه ذرات خاک، پدیده مجاورت^{۱۱} و آثار توابع توزیع بازتابش دوجته (BRDFs)^{۱۲}، درمقایسه با روش‌های طیف‌سنجی آزمایشگاهی و میدانی، سبب کاهش توانایی دورسنجی هوایی و فضایی در استنتاج خصوصیات خاک خواهند شد (Nocita et al., 2013).

براساس این علائم طیفی، فناوری طیف‌سنجی آزمایشگاهی (LDRS)^۱ امکان آن را دارد همچون ابزاری نیرومند در تخمین پارامترهای خاک به‌کار گرفته شود (Gomez et al., 2013). طبق این روش، فرض بر آن است که تغییرات در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی خاک سبب ایجاد منحنی‌های مشخصه بازتاب خاک (SRCC)^۲ می‌شود که به‌یقین، از طریق طیف‌سنجی بازتابی پراکنشی (LDRS) در دامنه طیفی ۲۵۰-۳۵۰ نانومتر (VNIR)، می‌شود آنها را شناسایی و آشکار کرد (Conforti et al., 2013). این تکنیک که بر مبنای علائم جذبی و بازتابی حاصل از ارتعاشات پیوندهای شیمیایی و معدنی استوار است، ممکن است هم در سنجش‌های آزمایشگاهی (LS)^۳ و هم در سنجش‌های درجا^۴ استفاده شود و نتایج آن به سکوه‌های ماهواره‌ای و هوایی تعمیم‌پذیر است (Stenberg et al., 2010; Kagan et al., 2014). همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، این روش درمقایسه با تحلیل‌های فیزیکی یا شیمیایی سنتی، مزایای چندی دارد، همچون نیاز به حداقل آماده‌سازی نمونه (Viscarra Rossel et al., 2011)، سرعت تحلیل، به حداقل رسیدن استفاده تخریبی از نمونه‌ها (Matney et al., 2014)، به‌کار نبردن مواد شیمیایی مضر و تعیین کمی هم‌زمان^۵ چندین خصوصیت خاک با یکبار قرائت طیفی (Vohland et al., 2011). همچنین، این فناوری تا حد بسیاری تحت تأثیر ساختمان و خصوصیات فیزیکی مواد است (Quan et al., 2013) و نیز اندازه و شکل ذرات، حفرات بین ذرات و ترتیب و نظم ذرات در طول مسیر انتقال تابشی^۶ تأثیر می‌گذارد و بنابراین، در فرایند بازتاب نیز بسیار مؤثر خواهد بود. در نتیجه، خصوصیات خاک را، براساس رفتارها و علائم طیفی آن، می‌شود مطالعه و بررسی کرد (Chang et al., 2001). به‌طوری‌که ویسر و همکاران^۷ (2007)، از طیف‌سنجی بازتابی دامنه VNIR برای بررسی و برآورد مقادیر کل رس و نیز رس ریز استفاده کردند و فهمیدند که فناوری VNIRS شیوه‌ای مطلوب در برآورد سریع و

1. Lab Diffuse Reflectance Spectroscopy
2. Soil Reflectance Characteristic Curve
3. lab spectroscopy
4. in-situ spectroscopy
5. simultaneous prediction
6. Radiative transferring path length
7. Waiser et al.
8. Bricklemeyer and Brown
9. lab & mobile VNIR-reflectance spectroscopy
10. spatial scaling variations
11. in-field operations
12. Field Spectroscopy
13. spaceborne-airborne remote sensing
14. atmospheric attenuation
15. Signal-to-Noise Ratio
16. unstable irradiance conditions
17. spatial variability
18. vicinity effect
19. Bidirectional Reflectance Distribution Functions

۳- سنجش مجاورتی بافت خاک^۱، مبنای دورسنجی ابرطیفی^۲ بافت خاک (در مقیاس وسیع)

معمولاً سنجش و بررسی پارامترهای خاک با استفاده از فناوری‌های ابرطیف‌سنجی^۳ (اعم از آزمایشگاهی یا سیار، زمینی یا هوایی/فضایی)، بر مبنای رفتارها و علائم طیفی است که خاک‌ها از خود نشان می‌دهند. روی هم رفته، رفتارهای طیفی خاک و بالطبع، منحنی‌های بازتابی طیفی خاک (SSRC/SSCC) از کروموفورهای خاک^۴ (عوامل فعال رنگی/طیفی) تأثیر می‌پذیرد. بر این اساس، کروموفورهای خاک - که در واقع، عوامل فعال اثرگذار در رفتارهای طیفی خاک^۵ به‌شمار می‌آیند - به دو دسته تقسیم می‌شوند: شیمیایی و فیزیکی (Ben-Dor et al., 2008). کروموفورهای شیمیایی شامل آن موادی اند که تابش ورودی را در سطوح انرژی مجزا جذب می‌کنند. به طوری که همه پدیده‌ها در دامنه طیفی VNIR-SWIR علائم طیفی مشخصی^۶ دارند. در خاک‌ها، سه کروموفور شیمیایی غالب طبقه‌بندی می‌شوند: ۱. مینرال‌ها (غالباً شامل رس، اکسیدهای آهن، کانی‌های اولیه فلدسپار، نمک‌ها و مواد مقاوم به حل شدن، همچون کربنات‌ها و فسفات‌ها)؛ ۲. مواد آلی (تازه و یا تجزیه‌شده)؛ ۳. آب (جامد، مایع و گاز). کروموفورهای فیزیکی خصوصیات آنند که در کل دامنه طیفی^۷ و نیز موقعیت باندهای ویژه^۸ اثرگذارند. نمونه‌هایی از این نوع کروموفورها شامل تغییرات اندازه ذرات خاک (بافت) و شاخص‌های انکسار^۹ موادی است که از یک شرایط تابشی به شرایط دیگر تغییر می‌کنند (Ben-Dor et al., 2008). اجزای بافت خاک، از نظر علم طیف‌سنجی، حدواسط کروموفورهای فیزیکی و شیمیایی به حساب می‌آید که باید بیشتر آن را مطالعه کرد. بر این اساس، توانایی و قابلیت برآورد مقادیر اجزای رسی (مینرالوژیکی)، با استفاده از دورسنجی مادون قرمز نزدیک (NIRS)^{۱۰} نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Sawut et al., 2014). طبق نظر استنبرگ و همکاران^{۱۱} (2010)، جزء رس خاک از مهم‌ترین اجزای بافتی خاک است که پدیده‌های جذبی تشخیص‌دانی^{۱۲} در طول موج‌های مرئی و فروسرخ

نزدیک دارد. همچنان، کاونگ و همکاران^{۱۳} (2012) بیان داشته‌اند که اجزای رسی را، به دلیل پاسخ طیفی مستقیم کانی‌های رسی^{۱۴} (مینرالوژیکی) در دامنه طیفی حدود ۲۲۰۰-۲۳۰۰ نانومتر، می‌شود سنجش و آشکارسازی کرد. البته استنبرگ و همکاران (2010) اخطار داده‌اند که موقعیت این باندهای جذبی ممکن است بر اساس ترکیبات آنها فرق کند. بر مبنای مطالب یادشده، هدف از تحقیق حاضر بررسی رفتارها و علائم طیفی اجزای رسی بافت خاک، به‌منزله فاکتور غالب طیفی و نیز ارزیابی پتانسیل طیف‌سنجی بازتابی آزمایشگاهی مرئی - فروسرخ نزدیک و موج کوتاه (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر)، در آشکارسازی اجزای رسی بافت خاک، با بهره‌گیری از روش‌های آنالیز پیشرفته طیفی - آماری، جهت تعیین و تخمین مقادیر آن‌ها در بخش‌هایی از استان مازندران بوده است. شایان ذکر است تحقیق حاضر، در بررسی پارامتر اجزای رسی بافت خاک، مبنای پایه تحقیقات سنجش از دور (دورسنجی ابرطیفی) در استان مازندران خواهد بود. زیرا مدل‌های تخمینگر و نیز باندهای طیفی به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر را می‌شود به تصاویر دورسنجی ابرطیفی از استان بسط و گسترش داد.

۴- مواد و روش‌ها عملیات نمونه‌برداری

پیش از تحلیل‌های طیفی، برای دستیابی به تغییرپذیری و تنوع اجزای رسی بافت خاک، باید از

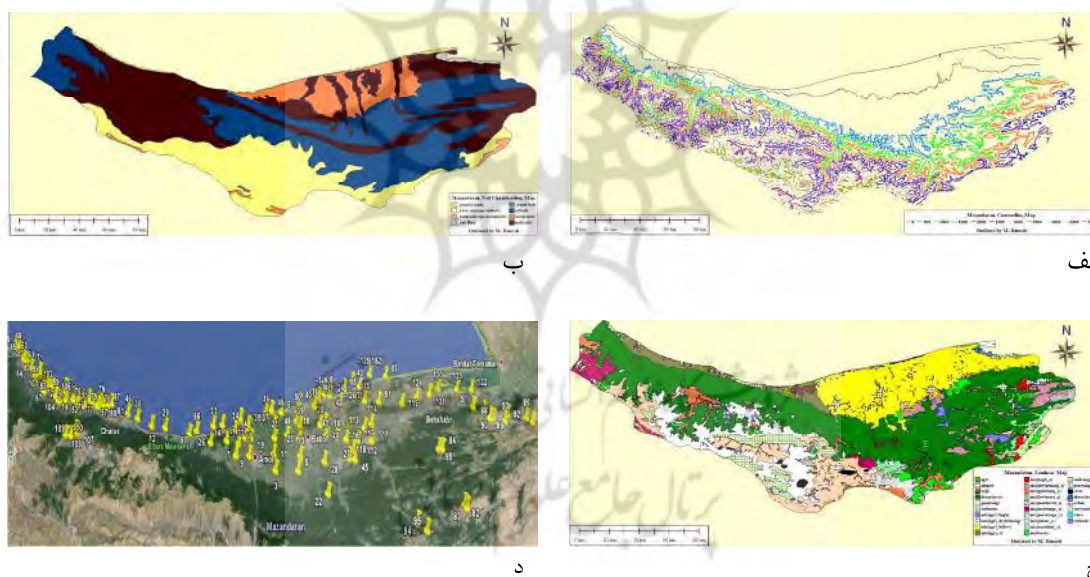
1. soil texture proximal sensnig
2. hyperspectral remote sensing
3. hyperspectroscopy technology
4. soil chromophores
5. soil spectral behaviours
6. recognizable spectral signatures
7. whole reflected spectrum
8. particular waveband situations
9. Refractive index
10. Near Infra Red reflectance spectroscopy
11. Stenberg et al.
12. recognizable absorption behaviours
13. Kuang et al.
14. Direct spectral response of clay minerals (clay fraction)

دوم به آزمایشگاه طیف‌سنجی (اتاق تاریک)، برای تحلیل و سنجش‌های طیفی منتقل شد.

چیدمان آزمایشگاه طیف‌سنجی و شیوه طیف‌سنجی بازتابی ابرطیفی^۲ (HRS)

طیف‌ها با استفاده از دستگاه تحلیل طیفی اسپکترورادیومتر (ASD)^۳ واقع در اتاق تاریک سنجیده شدند (شکل ۲). علائم تابشی از طریق فیبرنوری^۴ با میدان دید مخروطی^۵ ۲۵ درجه (بدون پیش‌سنجیده) جمع‌آوری شدند. برای هر طیف خروجی، ۲۵ طیف منفرد^۶ (زیرطیف^۸)، با فواصل یک ثانیه‌ای، میانگین‌گیری شد. طیف‌های تابشی (رادینانس)، با استفاده از پنل مرجع سفید اسپکترالون^۹، برای تولید طیف‌های بازتابی نرمال‌سازی شدند. برای تمامی سنجش‌ها، از یک

خاک‌های جغرافیایی گوناگون نمونه‌برداری شود (Summers et al., 2011). بنابراین، براساس اطلاعات متنوع زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و نقشه راه‌ها، و براساس روش طبقه‌بندی شده تصادفی^۱ (Kagan et al., 2014)، تعداد ۱۲۸ نمونه از ۲۰ سانتیمتری سطح خاک بخش‌های متفاوت استان مازندران جمع‌آوری و موقعیت مکانی آن‌ها به وسیله جی‌پی‌اس دستی (Garmin Montana 650)، با دقت تقریبی چهار متر، ثبت شد (شکل ۱). در آزمایشگاه خاک‌شناسی، پس از عملیات خرد کردن کلوخه، هواخشک شدن و رد شدن از الک دو میلیمتری، هر نمونه به دو بخش تقسیم شد: بخش اول برای تعیین نسبت اجزای رسی بافت، با استفاده از روش هیدرومتر (Camargo et al., 2009) تخصیص داده شد و بخش



شکل ۱. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در عملیات نمونه‌برداری، لایه‌های برداری (vector layers): الف) خطوط هم‌ارتفاع (contourline)؛ ب) خاک‌شناسی، ج) کاربری اراضی، د) موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده از بخش‌هایی از استان مازندران

1. Stratified Randomized Sampling method
2. Hyperspectral Reflectance Spectroscopy
3. Analytical Spectral Device- FieldSpecPro III
4. fiber-optic
5. conic nominal field of view(CFOV)
6. Foreoptic
7. individual spectrum
8. sub-spectrum
9. spectralon standard white reference panel

طیفی^۶، از گزینه جریان تاریک^۷ (DC) برای افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۸ و نیز از مرجع سفید اسپکترالون، به‌طور تقریبی، به‌ازای هر نیم ساعت نمونه‌برداری طیفی، برای کالیبره کردن انعکاس طیفی بهره برده شد (به‌همراه عملیات بهینه‌سازی عملکرد سنجنده طیفی^۹). بدین طریق، نمونه‌های خاک اسکن شد و بازتاب‌های مطلق، در دامنه طیفی ۲۵۰-۳۵۰ نانومتر و با قدرت تفکیک طیفی خروجی یک نانومتر، سبب تولید ۲۱۵۱ نقطه داده طیفی (SDP)^{۱۰}، به‌ازای هر نمونه خاک، شد.

تحلیل آماری - طیفی^{۱۱}

PLSR^{۱۲} (رگرسیون حداقل مربعات جزئی) از معمول‌ترین روش‌های آماری شیمیایی سنجی چندمتغیره^{۱۳} است که با هدف کالیبراسیون طیفی و تخمین خصوصیات خاک به‌کار برده می‌شود (Gomez et al., 2013). PLSR سبب استخراج ترکیبات خطی متوالی از تخمینگرها^{۱۴} می‌شود که تغییرات پاسخ^{۱۵} و تغییرات تخمینگر^{۱۶} را هم‌زمان مورد بررسی مطلوب قرار می‌دهد (Minansy and Hartemink, 2011). افزون‌بر آن، روشی است که از طریق بهره‌گیری از تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^{۱۷} و رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)^{۱۸}، بر مشکلات چندمخطی‌گری و

چیدمان آزمایشگاهی معمول استفاده شد (شکل ۲). تابش با استفاده از یک لامپ حبابی تقریبی پنجاه وات هالوژن با منبع تغذیه مجزا ایجاد شد. منبع نوری در فاصله تقریبی پنجاه سانتی‌متری، با زاویه ارتفاعی ۴۵ درجه به‌نسبت هدف قرار گرفت. برخی از نویزهای موقتی و طیفی^۱ در دامنه‌های انتهایی^۲ مشاهده شد (به شکل ۳ الف) و شکل ۵ دقت شود. در قسمت‌های انتهایی طیف‌های بازتابی، اعوجاجات اندک طیفی در دامنه ۳۷۰-۳۵۰ و اعوجاجات شدید طیفی در محدوده ۲۵۰-۲۴۶۰ نانومتر رخ داده‌اند که دلیل آن انرژی خروجی پایین لامپ در طول‌موج‌های UV و SWIR بوده است (Small et al., 2009).



شکل ۲. چیدمان دستگاه طیف‌سنجی بازتابی پراکنشی آزمایشگاهی (LDRS) در اتاق تاریک

نمونه‌های خاک (برای کاهش آثار مزاحم رطوبت و تداخل ساختاری خاک^۳ در رفتار طیفی نمونه‌ها (Kuang et al., 2012)، نمونه‌ها هواخشک و الک شدند)، در یک پتری‌دیش به قطر تقریبی ده سانتی‌متر، قرار گرفتند و با کاردک سطح آن‌ها هموار شد و سپس، جهت بررسی‌های طیفی، به اتاق تاریک منتقل شدند. هر نمونه چهار بار (به‌ازای هر چرخش نود درجه‌ای متوالی)، برای حذف آثار تغییر در هندسه تابش^۴، مورد سنجش طیفی قرار گرفت. زیرا از نظر علم طیف‌سنجی (دورسنجی و یا مجاورت‌سنجی)، هندسه تابش قادر است در تابع توزیع بازتاب دوجبهته^۵ (BRDF) اثر بگذارد، بنابراین، لازم است که آثار تغییر هندسه تابش بر بازتاب‌های سنجش شده به کمترین میزان برسد (Small et al., 2009). پیش از آغاز نمونه‌برداری

1. spectral & temporal noises
2. extremities
3. soil structural interference
4. radiance/viewing geometry
5. Bidirectional Reflectance Distribution Function
6. spectral/optical sampling
7. Dark Current option
8. Signal-to-Noise Ratio
9. sensor efficiency optimization procedure
10. Spectral Data Point
11. Spectral-statistical analysis
12. Partial Least Squares Regression technique
13. multivariate statistical chemometrics
14. predictors (X)
15. Y-explained variance
16. X-explained variance
17. Principal Components Analysis
18. Multiple Linear Regression

۵- نتایج

آنالیز آماری نمونه‌ها

آنالیز واریانس (ANOVA) مقادیر رس نمونه‌ها (جدول ۱ و شکل ۴) مشخص کرد که این ویژگی دارای ضریب تغییرات ۵۵/۳٪ است و با دامنه ۶۸٪، تغییرات مناسبی داشته است. بنابراین، تلاش برای نمونه‌برداری براساس لایه‌های اطلاعاتی یادشده، جهت تغییرات مناسب این ویژگی، درست بوده است. همچنین مقادیر کمینه و بیشینه آن، به ترتیب، ۰/۲٪ و ۷۰٪ بوده است. طبق آزمون نرمال کولموگروف-اسمیرنوف^{۲۰} و نیز تست Q-Q plot و Box-plot، مشخص شد که توزیع مقادیر رس نرمال و بدون داده پرت است (شکل ۴). همچنین براساس جدول توصیف آماری (جدول ۱)، می‌شود طبق نزدیک بودن مقادیر میانگین، میانه و مد، به نرمال بودن داده‌ها پی برد. البته با توجه به ویژگی‌های توزیع^{۲۱}، این پارامتر خاک دارای کشیدگی^{۲۲} و کمی چولگی^{۲۳} نیز بوده است (جدول ۱).

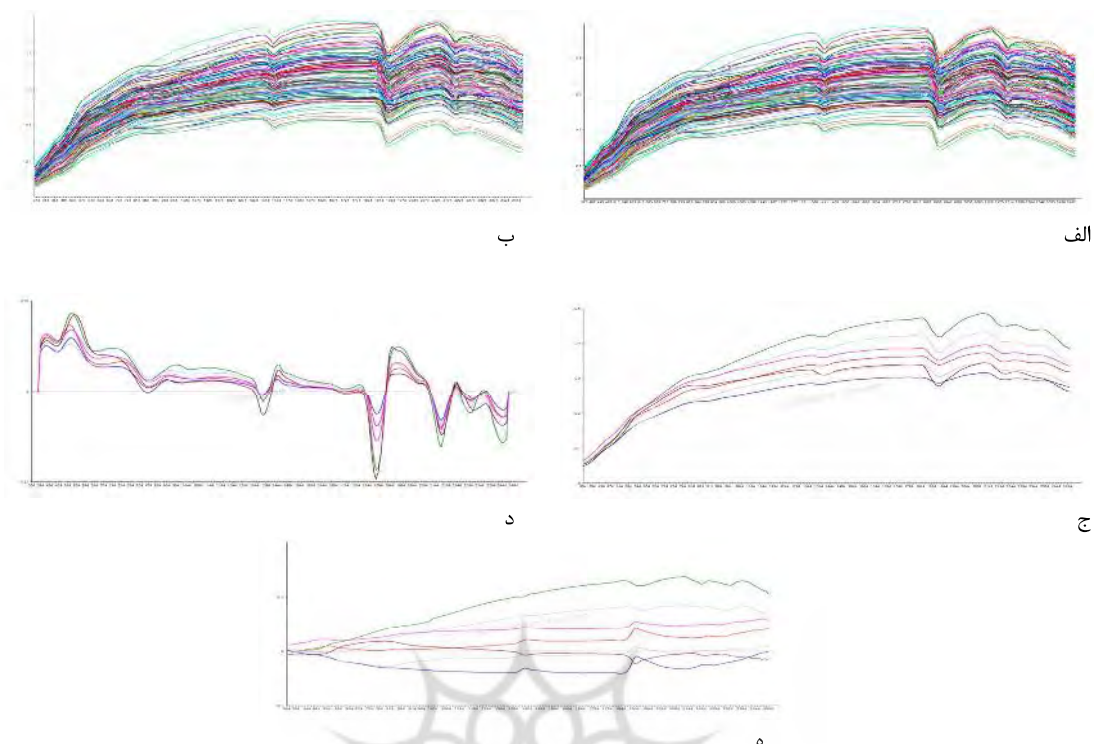
خودهمبستگی^۱ بین متغیرهای طیفی و نمونه‌ها غلبه می‌کند و مجموعه‌ای از اجزا یا بردارهای پنهان (LVs)^۲ را می‌یابد که سبب کاهش و یا تجزیه ماتریس متغیرهای طیفی تخمینگر (X) می‌شود و تا آنجا که امکان دارد، سبب همبستگی^۳ بین متغیرهای پاسخ (Y)^۴ با متغیرهای مستقل (X)^۵ می‌شود (Summers et al., 2011). تعداد بردارهای پنهان براساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقاطع (CV)^۶ تعیین می‌شود (Abdi, 2003). بنابراین، رگرسیون حداقل مربعات جزئی روشی است که تعداد وسیعی از متغیرهای طیفی هم‌خط^۷ را که دارای خودهمبستگی‌اند، به تعداد کمی متغیرهای پنهان غیرهمبسته^۸ می‌کاهد، درحالی‌که سبب افزایش هم-تغییرپذیری^۹ متغیرهای مورد بررسی^{۱۰} می‌شود (Geladi and Kowalski, 1986; Darvishzadeh et al., 2011).

عملیات پیش پردازش طیفی^{۱۱}

برای کاهش آثار نویز و تداخل‌های ناشی از تجهیزات نوری (هندسه تابش و نویز منبع نوری)، داده‌های طیفی خام (شکل ۳الف))، به‌ازای هر ده نانومتر، به‌طور یکنواخت، دوباره نمونه‌برداری شدند (شکل ۳ب)). بنابراین، تعداد متغیرهای تخمینگر (مستقل) برای هر نمونه، از ۲۱۵۱ به ۲۱۶ باند طیفی کاهش یافت. در روش‌های پردازش طیفی، این مرحله را روش کاهش حجم داده‌ها^{۱۲} می‌نامند (Kagan et al., 2014). همچنین، برای هموارسازی^{۱۳} و کاهش نویزهای تصادفی و موقتی، از فیلتر هموارساز ساویتسکی-گولای^{۱۴} مرتبه ۲ به‌همراه سه نقطه هموارساز^{۱۵} (چپ و راست) و نیز هسته تقارنی^{۱۶} بهره گرفته شد (شکل ۳ج)). سپس، طیف‌های خام و هموارسازی‌شده به‌وسیله تحلیل مشتق اول^{۱۷} (شکل ۳د)) و عملیات مرکزگیری^{۱۸} (شکل ۳ه)) آزموده شدند. جهت تعیین پیش‌پردازش مطلوب، فرایند اعتبارسنجی متقاطع^{۱۹} برای کل نمونه‌ها به‌کار رفت (Casa et al., 2013). نتایج آنها براساس میانگین مربعات خطا (RMSEcv)، ضریب تبیین (R²cv) و نیز انحراف (bias) مقایسه شد.

1. autocorrelation/multi-collinearity
2. Latent vectors
3. co-variation
4. response variables
5. independent variables
6. Cross-Validation tech.
7. collinear/intercorrelated spectral variables
8. non-correlated LVs
9. co-variability
10. variables of interest
11. spectral preprocessing operation
12. spectral dimensionality reduction
13. Smoothing technique
14. Savitzky-Golay spectral smoothing filter
15. Smoothing point
16. symmetric kernel
17. 1std-transformation
18. mean-centering procedure
19. full-cross validation algorithm
20. Kolmogorov-Smirnov normality test
21. statistical distribution properties
22. kurtosis
23. skewness

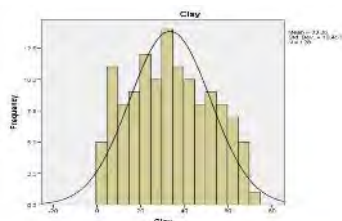
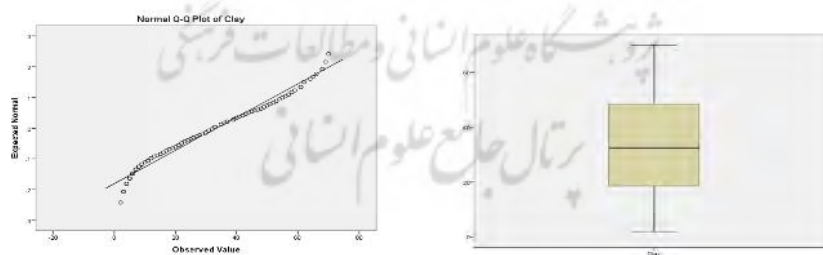
بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS)



شکل ۳- الف) طیف‌های خام؛ ب) طیف‌های میانگین‌گیری‌شده به‌ازای هر ده نانومتر؛ ج) چند طیف نمونه تحت عملیات هموارسازی SG؛ د) چند طیف نمونه تحت عملیات مشتق اول SG، ه) عملیات مرکزگیری طیفی (روی چند طیف نمونه)

جدول ۱. توصیف آماری نمونه‌ها براساس تحلیل واریانس مقادیر رس

متغیر	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی	میانگین	میانه	مد	انحراف از معیار	دامنه	ضریب تغییرات %
٪رس	۲	۷۰	۰/۱۴۰	-۰/۹۸۹	۳۳/۳۶	۳۲/۵	۳۳	۱۸/۴۵	۶۸	۵۵/۳



شکل ۴) الف) آزمون Q-Qplot برای تشخیص توزیع نرمال و داده پرت؛ ب) Boxplot برای تشخیص داده پرت؛ ج) منحنی توزیع نرمال منطبق بر هیستوگرام توزیع

دامنه مرئی تا حدی کمتر، و در فرورسرخ نزدیک بیشتر بوده است و با حضور باندهای جذبی مشخص (DABs)^۱ حدود ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر همراه بوده است. همچنین، طبق اظهارات بیشاپ و همکاران^۸ (1994)، پیک‌های جذبی حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر به حضور هر دو نوع آب کریستالی و آب هیدراته مربوط است (فرکانس‌های ارتعاشی گروه هیدروکسیل در مولکول آب) و پدیده‌های طیفی حدود ۲۵۰۰-۲۰۰۰ نانومتر به خصوصیات کانی‌های رسی و مواد آلی نیز مربوط است (Vašát et al., 2014). شایان ذکر است که با افزایش مقادیر رس، عمق پدیده‌های جذبی در باندهای ۱۹۰۰-۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ افزایش می‌یابد (Summers et al., 2011). به‌طور کلی، در تحقیق حاضر، برای خاک‌هایی با مقادیر رس بالاتر پدیده‌های جذبی قوی‌تری مشاهده شد، به‌ویژه در اطراف دامنه بازتابی ۴۰۰ الی ۲۲۰۰ نانومتر (شکل ۵). این نتیجه با مشاهدات استنبرگ و همکاران (2010) نیز کاملاً مطابق بوده است.

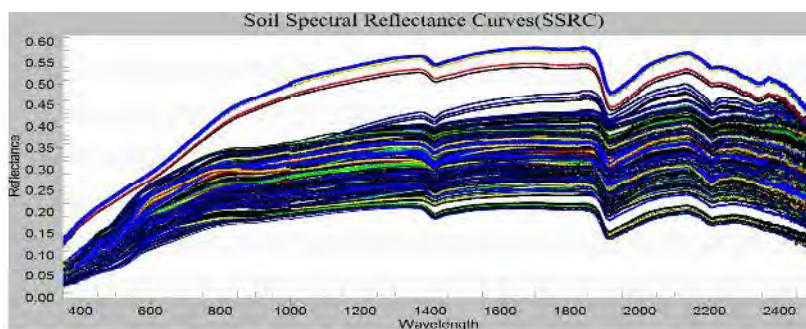
عملیات واسنجی (کالیبراسیون)

پیش از آغاز مراحل کالیبراسیون و انتخاب مدل مطلوب، نمونه‌ها به‌طور تصادفی دو قسمت شدند: ۷۵٪ نمونه‌ها برای عملیات واسنجی^۹ و ایجاد مدل و ۲۵٪ آنها برای عملیات اعتبارسنجی مستقل^{۱۰} به‌کار رفتند. برای اطمینان از توزیع مناسب نمونه‌ها و نیز مشابه بودن این دو گروه، از آزمون‌های نرمال کولموگروف-اسمیرنوف (جدول ۲)، استیودنت تی-تست^{۱۱} و لون-تست^{۱۲}، به‌ترتیب، برای اثبات مشابه بودن توزیع نرمال، میانگین و واریانس در دو گروه استفاده شد (McDowell et al., 2012) که نتایج آنها بیانگر شباهت کامل دو گروه در سطح معناداری ۰.۱٪ بود.

1. Demattê
2. spectral reflectance curve
3. spectral absorption features
4. soil spectral behaviour
5. Structural layer of minerals
6. Spectrally active constituents
7. Distinct Absorption Bands
8. Bishop et al.
9. calibration process
10. Stand-alone validation process
11. Student's T test
12. Levene's test

خصوصیات منحنی بازتاب خاک (SSRC)

همان‌طور که دماته^۱ (2002) بیان کرد، باید سه موضوع اصلی منحنی طیفی^۲ برای آشکارسازی تغییرات کیفی آن در نظر گرفته شود که شامل شدت بازتاب (آلیدو)، پدیده‌های جذبی^۳ (عمق و قدرت) و شکل طیف می‌شود. به‌طور کلی، رفتار طیفی خاک^۴، در امتداد مناطق گوناگون نمونه‌برداری، دچار تغییراتی می‌شود (تغییرات منحنی طیفی) که دلیل آن ترکیب پارامترهای متفاوت خاک و نیز تغییرات خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی القاشده از سوی فرایندهای خاک‌زایی است (شکل‌های ۳ و ۵: تفاوت بین منحنی‌های طیفی نمونه‌های جمع‌آوری شده). همچنین، تغییرات در شدت بازتاب غالباً به‌دلیل تفاوت و گوناگونی اندازه ذرات خاک و اجزای بافت خاک است، به‌گونه‌ای که خاک‌های دارای مقادیر کمتر رس مقادیر بالاتر انرژی بازتاب‌شده در کل طیف بازتابی را دارند (Demattê and Terra, 2014) که بر این اساس، دارای یک شکل افزایشی بازتاب، تقریباً بین ۱۸۰۰-۱۰۰۰ نانومتر، و کاهشی در قسمت باقی‌مانده طیف فرورسرخ نزدیک است (شکل ۵). با در نظر گرفتن پدیده‌های جذبی (SAFs) و رفتارهای طیفی کانی‌های رسی ۲:۱ (اسمکتایت، ورمی کیولایت، ایلایت و میکا) و کانی‌های رسی ۱:۱ (کتولینایت)، که در منحنی‌های طیفی بازتابی رخ می‌دهند (۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر)، براحتی می‌توان اجزای رسی را مورد شناسایی قرار داد، که دلیل آن ارتعاشات ناشی از برهم‌کنش انرژی در مولکول‌های هیدروکسیل و آب ($[H_2O] + [OH]$) است که در بین لایه‌های ساختاری مینرال‌ها^۵ یافت می‌شوند (Ben-Dor et al., 2008a). پدیده جذبی بارز دیگر را، به‌دلیل برهم‌کنش طیف تابشی با گروه آلومینیومی (Al-OH) مینرال‌های رسی در ۲۲۰۰ نانومتر، می‌شود آشکارسازی کرد و تشخیص داد (شکل ۳ب)، (ج، شکل ۵) (Demattê and Terra, 2014). به‌طور خلاصه، به‌دلیل وجود اجزا و خصوصیات فعال طیفی^۶ مشابه در نمونه‌ها، حالت کلی منحنی‌های طیفی بین نمونه‌ها مشابه بوده است (شکل ۵). همه طیف‌ها شکل بازتابی مشخصی داشته‌اند، درحالی‌که مقدار بازتاب در



شکل ۵. منحنی‌های بازتابش طیفی (SSRC) برخی از نمونه‌های خاک

جدول ۲. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در دو گروه واسنجی و اعتبارسنجی

فرض نرمال بودن	p-value	حد بحرانی	آماره کولموگروف-اسمیرنوف	سطح معناداری	تعداد نمونه	
تأیید	۰/۷۶۶	۰/۱۰۳	۰/۰۶۷۱	٪۱	۹۶	گروه کالیبراسیون
تأیید	۰/۹۳۵	۰/۱۷۵	۰/۰۹۲۶	٪۱	۳۲	گروه اعتبارسنجی

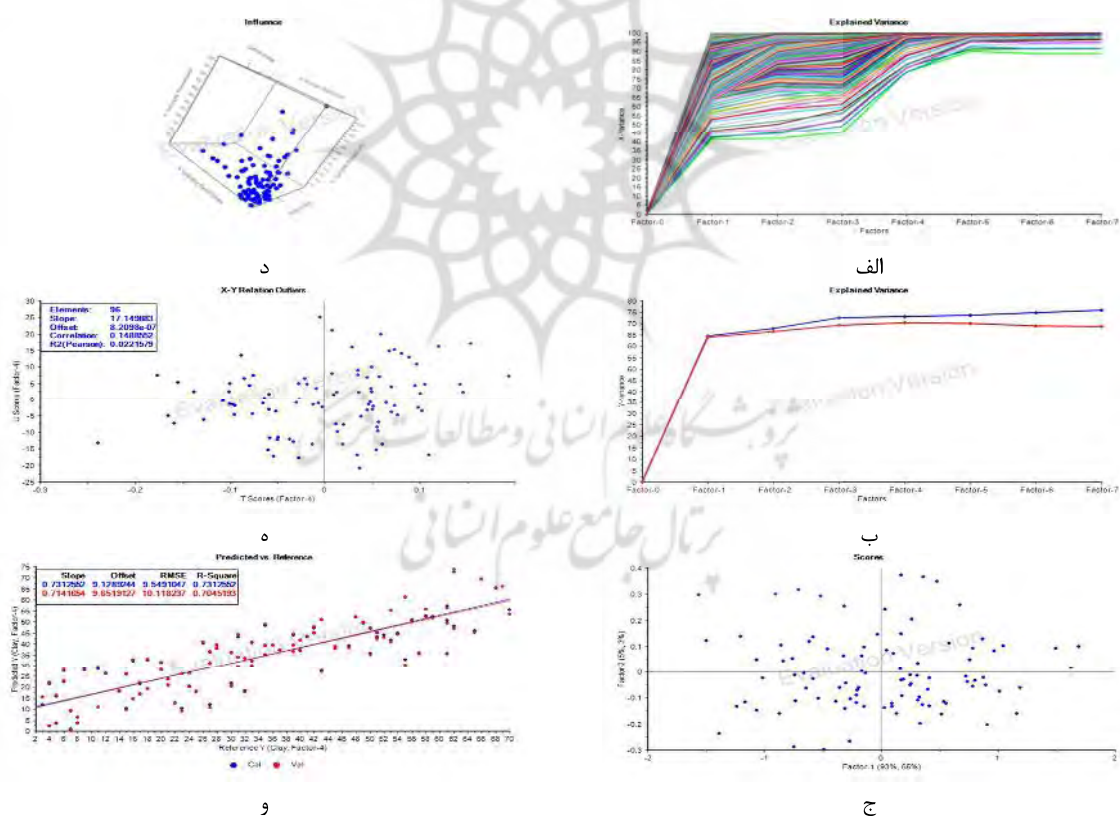
فاکتور پنهان اول بوده است (LV=4). آن گونه که در شکل ۶(الف)، (ب)، (و) مشاهده می‌شود، چهار فاکتور اول بیش از ۷۳٪ واریانس مقادیر رس و بیش از ۹۵٪ واریانس تباین طیفی^۵ را در خود جای داده است. همین عامل مانع از بیش‌برازش مدل می‌شود و از چندهم‌خطی‌گری و خودهمبستگی بین متغیرهای طیفی نیز جلوگیری می‌کند. همچنین براساس آزمون هتلینگ^۶، که بر مبنای لوریج تعدیل‌شده^۷، استوار است (شکل ۶(ی)، (ن)) و نیز آزمون تأثیر (IFt)^۸ (شکل ۶(د)، (ه))، مشخص شد که بیش از ۹۰٪ نمونه‌های این مجموعه تأثیر بسیار بارز و قوی در فرایند تخمین مقادیر رس و عملیات مدلینگ داشته‌اند که این امر حاکی از توزیع متوازن نمونه‌هاست. شایان ذکر است که

از آنجاکه متغیرهای تخمینگر (مستقل (X)) دارای چندهم‌خطی و خودهمبستگی و چندهمبستگی^۱ بسیاری‌اند، برای ایجاد مدل PLSR تخمینگر مناسب که بدون بیش‌برازش و یا کم‌برازش^۲ باشد (به دلیل وجود چندهم‌خطی‌گری)، باید از مدل مناسب که دارای حداقل مربعات جزئی (RMSE) براساس تعداد مطلوب فاکتور پنهان (LVs) است، بهره جست که قسمت غالب تغییرات موجود در تخمینگرها و پاسخ‌ها را در خود جای داده باشد (Lu et al., 2013). بنابراین، برای دستیابی به تعداد فاکتورهای مطلوب و نیز پرهیز از بیش‌تخمین^۳، از روش اعتبارسنجی متقاطع با متد حذف تکی کامل (FLOOCV)^۴ استفاده شد. براساس آنالیز متغیرهای وابسته (مقادیر رس نمونه‌ها) و متغیرهای مستقل (باندهای طیفی) (شکل ۶(الف)، (ب)، (ج)، (د)، (ه)) و نیز، مقادیر حداقل مقادیر مربعات خطا (RMSEcv) و مقادیر حداکثر ضرایب تبیین در مجموعه کالیبراسیون (R²cv) (شکل ۶(و)، (ک)، (ل)، (م))، مشخص شد که برای بررسی مقادیر رس در منطقه، مطلوب‌ترین تعداد فاکتورها براساس چهار

1. multi-collinearity/autocorrelation/multi-interconnection
2. overfitting/underfitting
3. overprediction avoidance
4. Full Leave-One-Out Cross Validation algorithm
5. spectral distinction variance
6. Hotelling T² statistic
7. adjusted leverage
8. Influence test

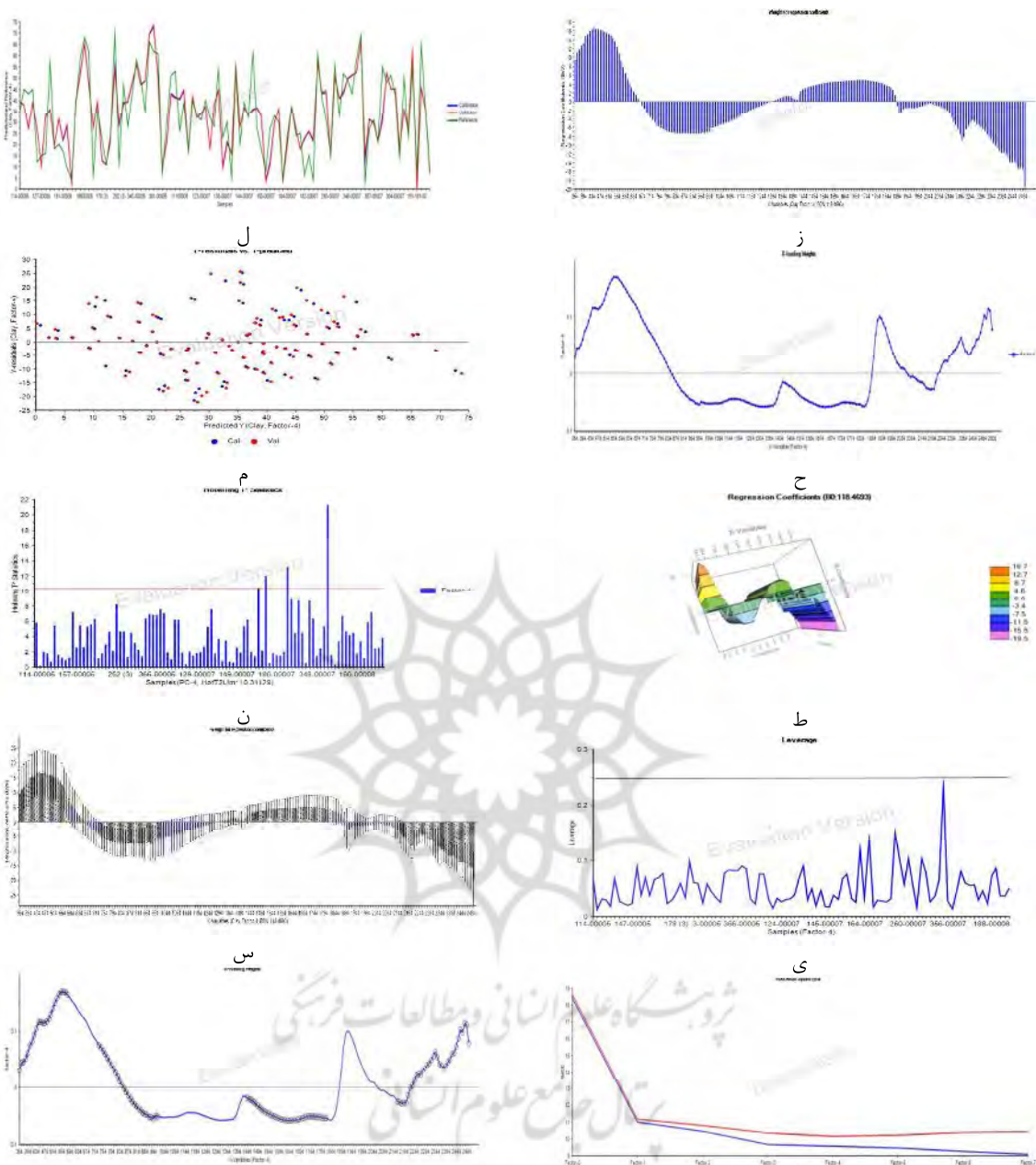
بیشترین تأثیر در فرایند تخمین رس در خاک‌های استان بوده‌اند (شکل ۶(ز)، (س)، (ع)). بنابراین، مدل کالیبراسیون نهایی براساس چهار فاکتور، با $RMSE_C$ حدود ۹/۵۵، R^2_C حدود ۰/۷۳، RPD_C تقریبی ۱/۹۴ و نیز $RPIQ_C$ (Bellon-Maurel et al., 2010) تقریبی ۳/۱۹ (ست کالیبراسیون)، مطلوب‌ترین مدل جهت برآورد مقادیر رس منطقه مورد بررسی (استان مازندران) شناخته شد (شکل ۶(و)، (ک)، (ل)، (م)). مشخصات مدل برآوردکننده نهایی مقادیر رس استان مازندران (مناطق نمونه برداری شده) و نیز نتایج آماری فاکتورهای محاسبه شده مدل (عملیات اعتبارسنجی مقاطع) در شکل ۷ و جدول ۳ گردآوری شده است.

فاکتور لوریج^۱، درواقع، منعکس‌کننده فاصله هر طیفی (X) از مرکز (میانگین طیفی) (Xc) در هر مدل است (Cook and Weisberg, 1982). سپس، بر مبنای ضرایب بتا (B-coef.)، آنالیز وزنی و نیز با استفاده از تست عدم قطعیت مارتن^۲، طول موج‌های مؤثر و معنادار^۳ تعیین و محاسبه شد (شکل ۶(ز)، (ح)، (ط)). بدین ترتیب، مؤثرترین باندهای طیفی در برآورد رس نیز مشخص شدند (شکل ۶(س)، (ع)). بر این اساس، دامنه‌های فرابنفش (UV) از ۳۷۰-۳۹۰ نانومتر، مرئی (VIS) از ۴۰۰-۵۷۰ نانومتر، دامنه فرورسرخ نزدیک (NIR) از ۷۴۰-۹۹۰ نانومتر و فرورسرخ موج کوتاه (SWIR) از ۱۴۰۰-۱۸۱۰ نانومتر، و از ۲۱۶۰-۲۴۳۰ نانومتر دارای

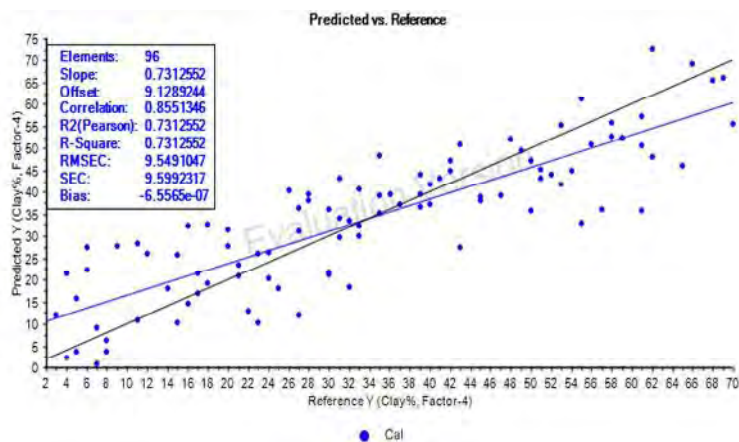


1. Leverage
2. Martens' uncertainty test
3. influential spectral wavebands

بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS)



شکل ۶. الف) واریانس توصیفی (explained variance) متغیرهای طیفی تخمینگر براساس تعداد فاکتورها؛ (ب) واریانس توصیفی متغیرهای پاسخ (مقادیر رس) به نسبت فاکتورها؛ (ج) عملیات امتیازبندی (scoring process) براساس مؤلفه اول و دوم؛ (د) نمودار سه‌بعدی آزمون تأثیر (IFT) بر مبنای مقادیر باقی‌مانده متغیرهای وابسته (Y-residuals)، مستقل (X-residuals) و لوریج تعدیلی (sample leverage) نمونه‌ها براساس چهار بردار پنهان؛ (ه) نسبت T-scores با U-scores بر مبنای فاکتور چهارم؛ (و) مقادیر برآوردی به وسیله مدل واسنجی شده براساس عملیات اعتبارسنجی متقاطع کامل (FCV)؛ (ز) ضرایب رگرسیونی باندهای طیفی (ضرایب وزنی BW) برای تعیین باندهای مؤثر در تخمین مقادیر رس؛ (ح) مقادیر وزنی فاکتور چهارم (X-loading weights) و اهمیت بخش‌های گوناگون طیفی در آن؛ (ط) ضرایب رگرسیونی نهایی باندهای طیفی (متغیرهای تخمینگر طیفی)؛ (ی) آزمون لوریج تعدیل‌شده (adjusted leverage test) نمونه‌ها بر مبنای فاکتور چهارم پنهان (LF=4)؛ (ک) مقادیر مربعات خطای میانگین عملیات واسنجی و اعتبارسنجی متقاطع (RMSEcv-RMSEc) براساس هفت فاکتور (ل)؛ (م) نسبت بین مقادیر تخمین‌زده شده و مقادیر مرجع آزمایشگاهی (predicted vs reference) رس منطقه به‌ازای هر نمونه و بر مبنای LV=4؛ (ن) نسبت بین مقادیر برآورد شده و مقادیر باقی‌مانده آن (LV=4)؛ (ز) آزمون هتلینگ T^2 به‌ازای هر نمونه؛ (س) آزمون عدم قطعیت مارتن (Martens' uncertainty test) برای تشخیص باندهای طیفی مهم؛ (ع) نتایج آزمون عدم قطعیت مارتن روی فاکتور چهارم (طول‌موج‌های مفید در بررسی متغیرهای پاسخ (رس)).



شکل ۷. مدل برآوردکننده نهایی مقادیر رس منطقه براساس چهار بردار پنهان، طبق عملیات واسنجی به روش اعتبارسنجی متقاطع با متد حذف تکی (full leave one out-cross validation algorithm)

جدول ۳. عملیات اعتبارسنجی متقاطع (CV) برای تعیین بهترین فاکتور پنهان. مشخصات آماری هفت فاکتور در نظر گرفته شده برای مدل و انتخاب فاکتور چهارم به منزله بهترین تخمینگر (عملیات اعتبارسنجی متقاطع)

Prediction di	RMSEP	SEP	Bias	Slope	Offset	Correlation	SEPCorr	ICM_Slope	ICM_Offset
Clay	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factor-1	11.1539	11.2124	-0.0073	0.6398	12.2298	0.7959	11.2115	0.9901	0.3446
Factor-2	10.7650	10.8214	-0.0275	0.6698	11.1907	0.8116	10.8185	0.9834	0.5900
Factor-3	10.3397	10.3933	-0.1200	0.7031	9.9638	0.8279	10.3857	0.9748	0.9736
Factor-4	10.1182	10.1712	-0.0575	0.7142	9.6519	0.8358	10.1654	0.9782	0.7956
Factor-5	10.1833	10.2367	-0.0354	0.7180	9.5431	0.8337	10.2240	0.9681	1.1171
Factor-6	10.3640	10.4184	-0.0131	0.7172	9.5921	0.8276	10.3933	0.9550	1.5414
Factor-7	10.4169	10.4717	0.0267	0.7182	9.5996	0.8259	10.4402	0.9498	1.6813

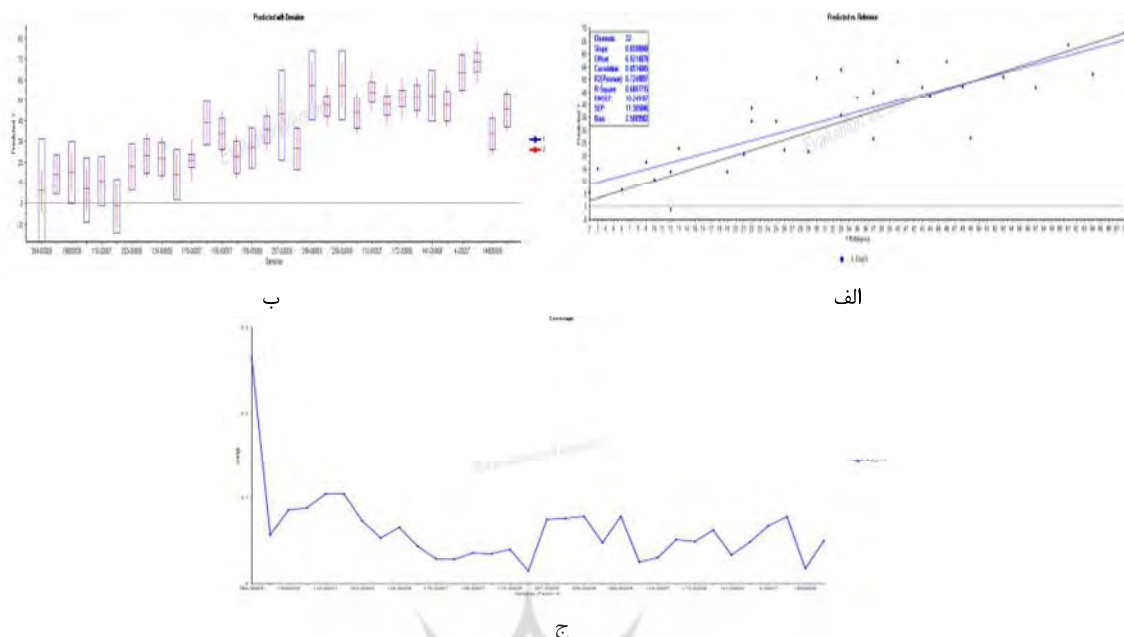
عملیات اعتبارسنجی

مرجع تعیین شده در آزمایشگاه (R_P) ۰/۸۵ بوده است. مقدار میانگین مربعات خطا (RMSEP) ۱۰/۲۴ و مقدار ضریب تبیین (R²_P) حدود ۰/۷۲ بوده و به همین ترتیب، مقادیر RPD_P و RPIQ_P آن نیز، به ترتیب، ۱/۸۰ و ۲/۶۴ و انحراف متوسط (bias) ۲/۵ بوده است (شکل ۸ و جدول ۴). براساس طبقه‌بندی کلی کیفیت و کارایی مدل، در صورتی که شاخص RPD بیش از ۲ باشد، برآورد بسیار دقیق است. اگر این شاخص بین ۱/۴ الی ۲ باشد، برآورد خوب است و اگر کمتر از ۱/۴ باشد، بیانگر ضعیف بودن قدرت مدل در فرایند تخمین است (Chang and Laird, 2002).

صحت‌سنجی^۱ و ارزیابی کیفیت مدل تخمینگر که در قسمت کالیبراسیون به دست آمده است، با استفاده از ۳۲ نمونه مستقل اعتبارسنجی^۲ (که در فرایند کالیبراسیون وارد نشده‌اند) انجام شد (Lu et al., 2013). طبق مدل PLS به دست آمده از ست کالیبراسیون که براساس چهار فاکتور بوده است (شکل‌های ۶، ۷ و جدول ۳)، مقادیر رس منطقه مطابق داده‌های طیفی این ۳۲ نمونه مستقل سنجیده شد و سپس، با مقادیر مرجع آن که در آزمایشگاه تعیین شده بودند، مقایسه شد. در نهایت، مقادیر رس نمونه‌های مستقل مجموعه اعتبارسنجی با دقت خوبی برآورد شد که در آنها مقادیر همبستگی بین داده‌های تخمین زده شده و داده‌های

1. Accuracy assessment
2. Separate standalone validation subset

بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS)



شکل ۸. عملیات اعتبارسنجی مستقل: (الف) مقادیر رس تخمین‌زده‌شده درمقایسه با مقادیر مرجع آزمایشگاهی به‌وسیله مدل تخمینگر (ست اعتبارسنجی)؛ (ب) مقادیر تخمین‌زده‌شده به‌همراه انحراف در مجموعه اعتبارسنجی؛ (ج) لوریج تخمینی نمونه‌ها در عملیات اعتبارسنجی مستقل

جدول ۴. عملیات اعتبارسنجی: پارامترهای آماری تخمین مقادیر رس در نمونه‌های مستقل، در زیرمجموعه اعتبارسنجی

Prediction di	RMSEP	SEP	Bias	Slope	Offset	Correlation	SEPCorr	ICM_Slope	ICM_Offset	
Clay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Factor-1	1	10.0750	10.8608	2.0629	0.8178	7.8063	0.8475	9.7825	0.8782	2.0275
Factor-2	2	9.7620	10.6676	2.2320	0.8465	7.0732	0.8606	9.3858	0.8750	1.9886
Factor-3	3	10.1431	11.9209	3.4051	0.8441	8.3222	0.8590	9.4362	0.8742	0.9904
Factor-4	4	10.2492	11.3051	2.5010	0.8598	6.9215	0.8514	9.6669	0.8431	2.8392

۶- بحث و نتیجه‌گیری

(2006a) نیز بیان کردند که بیشتر اجزای رسی پدیده‌های جذبی (SAFs)^{۱۱} در کل طیف مرئی (VIS) تا فرورسرخ موج‌کوتاه (SWIR) دارند. همه این موارد، به‌دلیل حضور علائم فرعی و ترکیبی کششی

تحقیقات نشان داده است که پیک‌های جذبی^۱ در اطراف ۲۲۰۰ نانومتر، مرتبط با اجزای رسی بافت است (CR₂₂₀₀)^۲ و دلیل آن وجود ارتعاشات ترکیبی^۳ حالات خمشی^۴ OH-Al و کششی^۵ OH- خاص کانی‌های رسی ایلایت، کئولینایت و مونت‌موریلونایت است (Curcio et al., 2013). همچنین، طی تحقیقاتی از سوی راجر و همکاران^۶ (2012)، فراوانی اجزای رسی با استفاده از عمق جذب غالب^۷ در باند طیفی ۲۲۰۰ نانومتر و با استفاده از تکنیک حذف پیوستار (CRT)^۸ در دامنه ۲۲۴۵-۲۱۲۵ نانومتر، براساس مدل چندجمله‌ای درجه دوم^۹ با سه نقطه عمقی تعیین شدند. افزون‌بر آن، ویسکارا راسل و همکاران^{۱۰}

1. spectral absorption peaks
2. continuum removed spectrum
3. combinations
4. bending overtones
5. stretching overtones
6. Rodger et al.
7. prominent absorption depth
8. Continuum Removal Technique
9. quadratic polynomial model
10. Viscarra Rossel et al.
11. Spectral Absorption Features

در دامنه فرورسرخ نزدیک (۱۰۰۰-۷۴۰ نانومتر) شده است (شکل ۵). دامنه فرورسرخ موج کوتاه (SWIR) نیز متأثر از وجود اجزای رسی بوده است. دلیل آن، از دید مینرالوژی، حضور رس‌های ایلیایت، مونتموریلونیات، کئولینایت، میکا و دیگر کانی‌های رسی حاضر در خاک‌های استان بوده است که علائم طیفی بارز در دامنه ۲۳۴۰-۲۲۰۰ نانومتر داشته‌اند. این نتیجه نیز مشابه تحقیق راولینز و همکاران (2011) بوده است.

بنابراین، طبق تحقیق حاضر، دقت مدل کالیبره شده (جدول ۳ و شکل‌های ۶ و ۷) و صحت مقادیر اعتبارسنجی شده (جدول ۴ و شکل ۸) با روش PLS چهار فاکتوری، کیفیت مناسب و عملکرد خوب مدل را در برآورد مقادیر رس منطقه، درمقایسه با تعداد اندک تحقیقات انجام شده در این زمینه، بیان می‌کند. به طوری که در تحقیقات کاگان و همکاران^۷ (2014)، آنها مقادیر رس را با تکنیک PLS و با ضریب تبیین (R^2) تقریبی ۰/۸ و میانگین مربعات خطا در مجموعه اعتبارسنجی (RMSEcv) ۱/۰۲ و نسبت عمل کرد به انحراف (RPD) حدود ۳/۰۳ برآورد کردند و طول موج‌های مؤثر را دامنه ۲۳۳۰-۲۰۰۰ نانومتر به دست آوردند. افزون بر آن، طول موج‌های مهم در برآورد رس، براساس داده‌های دورسنجی شده، از سوی برخی دیگر به این ترتیب بیان شده است: ۲۲۰۰ نانومتر (Ben-Dor and Banin, 1995)، ۱۹۱۲-۱۹۰۰ نانومتر (Islam et al., 2003)، و ۲۲۰۶ نانومتر (Lagacherie et al., 2008) که با مقادیر ضرایب تبیین (R^2) بین ۰/۸-۰/۵۶ همراه بوده است. همچنین، طی تحقیقی به وسیله شپرد و والش^۸ (2002)، مقادیر رس با روش قطعات رگرسیونی تطبیقی چندمتغیره (MARS)، با RMSE

هیدروکسیل و خمشی هیدروکسیل-فلز، در تحقیق حاضر نیز کاملاً مشهود و بارز بوده است. توزیع مقادیر وزنی^۱ ترسیم شده در شکل ۶ (ز)، (ح)، (ط)، (س)، (ع) تأیید می‌کند که دامنه‌های طیفی فرابنفش (UV)، مرئی (VIS)، فرورسرخ نزدیک (NIR) و موج کوتاه (SWIR) به کاررفته در روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSRt) برای بررسی اجزای رسی بافت منطقه بسیار حساس و مناسب است. بنابراین، اهمیت بسیار این دامنه‌های طیفی مشخص و بارز است و این امر، طبق تحقیقات کورسیو و همکاران^۲ (2013)، به دلیل توانایی تکنیک PLSR در بهره‌گیری از کل طیف^۳ بوده است. البته به نظر می‌رسید نتایج دقیق تری (با R^2_p بیشتر و RMSEp کمتر) برای برآورد اجزای رسی در نمونه‌های خاک استان مازندران حاصل شود. اما وجود مواد آلی، چه به شکل ذرات آلی و چه به شکل پوشش‌هایی روی سطوح کانی‌ها، که در بازتاب طیفی و آلبیدوی خاک در کل دامنه اثرگذار بوده است و بنابراین، رخداد پدیده‌های جذبی مواد آلی در این دامنه‌های بازتابی، سبب همپوشانی برخی از دامنه‌های طیفی مربوط به اجزای رس و در نتیجه، کاهش کیفیت مدل تخمینگر شده است. از این رو در برخی از موارد، ممکن است علائم طیفی مواد آلی با پدیده‌های طیفی اجزای رسی تطابق و همپوشانی داشته باشد و آن را ماسک کند (Rawlins et al., 2011). بنابراین، این اثر همپوشانی احتمالی علائم طیفی رس به وسیله علائم طیفی مواد آلی خاک) ممکن است سبب کاهش ضرایب رگرسیونی طول موج‌های به کاررفته در مدل آماری مورد نظر جهت تخمین مقادیر رس شود. طول موج‌های مؤثر تخمین زنده^۴ در دامنه بازتابی مرئی (شکل ۶(ز))، بیانگر اثر اجزای رس در بازتاب مرئی و نیز رنگ خاک استان مازندران است که اهمیت این دامنه طیفی (VIS) در تحقیق حاضر، در تطابق با اندک تحقیقات انجام شده از سوی راولینز و همکاران^۵ (2011) بوده است. همچنین، وجود احتمالی اکسیدهای آهن و ارتباط آن با مقادیر رس سبب ایجاد علائم طیفی ریز^۶

1. loading weights
2. Curcio et al.
3. whole spectrum
4. influential predictor wavelengths
5. Rawlins et al.
6. faint spectral signatures
7. Kagan et al.
8. Shepherd and Walsh

ایجاد اختلافاتی بین مدل‌های برآوردکننده در مناطق گوناگون و ایجاد تفاوت در نتایج برآورد رس می‌شود (تفاوت مدل‌های مناطق متفاوت)، همچون: ۱. تفاوت در مواد مادری، که در مینرالوژی اجزای رسی اثر بسزایی دارد، و نیز، حضور پوشش‌های اکسیدی روی ذرات رسی که ممکن است سبب اختلال در طیف تشخیصی رس شود (Rawlins et al., 2011)؛ ۲. مقادیر مواد آلی که ممکن است در بازتاب کل اثر بگذارد و تا حدی آفت طیفی ایجاد کند؛ ۳. شیوه نمونه‌برداری؛ ۴. خطاهای آزمایشگاهی (آزمایشگاه طیف‌سنجی و آزمایشگاه خاک‌شناسی)؛ ۵. شیوه‌های گوناگون اسکن کردن؛ ۶. نوع مجموعه نمونه‌ها (همگن و ناهمگن از نظر مینرالوژی و بافت و انتخاب آن‌ها)؛ ۷. روش‌های شیمیایی‌سنجی^۴ (نوع رگرسیون چندمتغیره، وجود داده‌های پرت، روش‌های پیش‌پرازش محاسباتی، اعتبارسنجی مستقل یا متقاطع و مانند آن)؛ ۷. تکرارهای احتمالی و نیز دیگر منابع خطا (Gras et al., 2014). با توجه به این مهم که امروزه نسل جدیدی از دورسنجنده‌های ابرطیفی^۵، با قدرت تفکیک طیفی بالا^۶ ($FWHM < 10 \text{ nm}$)، عملیات سنجش را از سکوه‌های هوایی و فضایی^۷، در مقیاس بسیار وسیع انجام می‌دهند (Curcio et al., 2013)، چه‌بسا نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نقطه آغازی برای پهنه‌بندی دقیق مقادیر رس خاک، بر مبنای سنجش از دور و با استفاده از سکوه‌های دورسنجی و در مقیاس بسیار وسیع‌تر باشد. برای این هدف، باید تحقیقات بیشتری روی کاربرد طیف‌سنجی (دورسنجی یا مجاورت‌سنجی) برای تخمین مقادیر رس خاک انجام پذیرد. نتایج نهایی به‌دست‌آمده بیان می‌کند به سطح رضایتبخشی از برآورد اجزای رس خاک، با استفاده از داده‌های ابرطیفی

حدود $7/5$ و R^2 حدود $0/78$ ، در دامنه طیفی VNIR برآورد شدند. البته کازولیونو و مارون^۱ (2003) آن را با دقت بالاتر و R^2 تقریبی $0/86$ و روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی تغییر یافته (MPLSR)، در دامنه کامل^۲ مرئی تا فرورسرخ موج کوتاه برآورد کردند. همچنین، ولکان-بیلگیلی و همکاران^۳ (2010) توانستند مقادیر رس را با R^2 تقریبی $0/84$ و RMSE اعتبارسنجی حدود $38/20$ تعیین کنند. در مورد کیفیت و ارزیابی مدل باید متذکر شد چون خصوصیات خاک جمع‌آوری شده از سطح وسیع (قسمت‌های گوناگون استان مازندران) بوده است و، طبق جدول ۱، به دلیل تنوع فاکتورهای خاک‌زایی و نیز خطاهای احتمالی آزمایشگاهی، اندکی چولگی و نیز کشیدگی در توزیع مقادیر رس داشته است، برای بیان و مقایسه کیفیت و توانایی مدل بهتر است از فاکتور نسبت عملکرد به فاصله درون چارکی (RPIQ) به جای فاکتور نسبت عملکرد به انحراف (RPD) استفاده شود، زیرا پارامتر آماری RPD بر اساس انحراف معیار در توزیع است، در صورتی که پارامتر تحلیلی-آماري RPIQ بر اساس فاصله درون چارکی است و بهتر می‌تواند توانایی مدل را بر اساس نحوه توزیع نمونه‌ها توضیح دهد (Bellon-Maurel and McBratney, 2011). مدل نهایی عملیات واسنجی (کالیبراسیون)، با $RMSE_C$ حدود $9/55$ و R^2_C حدود $0/73$ و نیز RPD_C تقریبی $1/94$ و RPIQ_C حدود $3/19$ ، و در مجموعه اعتبارسنجی نیز این مقادیر، به ترتیب، $10/24$ ، $0/72$ ، $1/8$ و $2/64$ بوده است، بنابراین، طبق مقادیر RPIQ که بالای ۲ بوده است، می‌شود نتیجه گرفت که مدل امکان ارائه تخمین بسیار خوبی از رس در منطقه را دارد که این امر نشانه کیفیت مناسب مدل‌های برآوردکننده مطابق داده‌های ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS) است.

با تحقیقی که انجام شد، اهمیت استفاده از روش‌های طیف‌سنجی بازتاب پراکنشی (DRS) در تعیین مقادیر رس خاک، در قالب روشی سریع و غیرتخریبی، به اثبات رسید. البته برخی از عوامل سبب

1. Cozzolino and Moron
2. full spectral domain
3. Volkan-Bilgili et al.
4. chemometrics procedure
5. hyperspectral remote sensor
6. high spectral resolution
7. airborne/spaceborne/ satellite platform

۷- منابع

- Abdi, H., 2003, **Partial Least Squares (PLS) Regression**, In: Lewis-Beck, M., Bryman, A., Futing, T., (Eds.), *Encyclopaedia for Research Methods for the Social Sciences*, Vol. Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- Bachmann, C.M., Philpot, W., Abelev, A. & Korwan, D., 2014, **Phase Angle Dependence of Sand Density Observable in Hyperspectral Reflectance**, *Remote Sensing of Environment*, 150(2014): PP. 53–65.
- Baldock, J.A. & Skjemstad, J.O., 2000, **Role of Soil Matrix and Minerals in Protecting Natural Organic Materials against Biological Attack**, *Organic Geochemistry*, 31, PP. 697–710.
- Bellon-Maurel, V., Fernandez-Ahumada, E., Palagos, B., Roger, J.M. & 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), PP. 1073–1081.
- Bellon-Maurel, V. & McBratney, A., 2011, **Near-Infrared (NIR) and Mid-Infrared (MIR) Spectroscopic Techniques for Assessing the Amount of Carbon Stock in Soils Critical Review and Research Perspectives**, *Soil Biol. Biochem.*, 43(7), PP. 1398-1410.
- Ben-Dor, E., Taylor, R.G., Hill, J., Dematte, J.A.M., Whiting, M.L., Chabrilat, S. & Sommer, S., 2008, **Imaging Spectrometry for Soil Applications**, *Advances in Agronomy*, Vol. 97, No. 2008, Elsevier Inc.
- Ben-Dor, E., Heller, D. & Chudnovsky, A., 2008a, **A Novel Method of Classifying Soil Profiles in the Field Using Optical Means**, *Soil.Sci.Soc.Am.J.*, 72, PP. 1113–1123.
- آزمایشگاهی (LDRS) و براساس روش PLSR در منطقه، می شود دست یافت. افزون بر آن، با این روش، امکان تعیین طول موج های کلیدی طیف کامل^۱ که پایه و مبنای برآورد این پارامتر خاک است، فراهم می شود. همچنین، می شود در آینده از این اطلاعات برای پهنه بندی مقادیر رس، با استفاده از سنجنده های (ابرطیفی) هوایی و فضایی (دورسنجی ابرطیفی)، بسیار دقیق تر بهره جست. در نهایت، تحقیق حاضر توانایی فناوری طیفسنجی بازتاب پراکنشی (DRS) را، با استفاده از طیف های ادغامی حاصل از دامنه های فرابنفش، مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه نشان می دهد که امکان بررسی کیفی و کمی مقادیر رس را در خاک استان مازندران دارد. نیز، یکی از مزایای اصلی استفاده از مجاورتسنجی طیفی مرئی- فروسرخ نزدیک^۲ در آنالیز خاک این است که می شود از طیفی ساده این اجزا (مقادیر رس) را ارزیابی و مطالعه کرد و سپس، با عملیات پیش مقیاس سازی^۳ (استفاده از مدل و باندهای طیفی به دست آمده از طیفسنجی آزمایشگاهی (LDRS) و انتقال آن به سکوی هوایی و فضایی ابرطیفی) و در سطح بسیار وسیع، آنها را بررسی کرد (Kagan et al., 2014). بنابراین، در مقیاس وسیع، سبب صرفه جویی در هزینه ها می شود و کارایی آن از روش های آنالیز سنتی بیشتر خواهد بود. علاوه بر آن، سرعت این تکنیک به آن امکان می دهد حجم وسیعی از نمونه ها را در شیوه ای عملی و بهنگام آنالیز و تحلیل کند. در پایان، این ویژگی ها سبب می شود شیوه طیفسنجی (آزمایشگاهی) در ادغام با تکنیک چندمتغیره PLSR، بسیار کارآمد شود و کاربرد آن به منزله پایه و اساس دورسنجی ابرطیفی، برای اهداف جامعی همچون پایش محیط زیست، مدل سازی خاک و کشاورزی دقیق ممکن می شود (Viscarra Rossel et al., 2006b).

1. whole spectrum key-wavelengths
2. VNIR proximal spectroscopy
3. scaling-up stage

- Ben-Dor, E. & Banin, A., 1995, **Near Infrared Analysis (Nira) as a Method to Simultaneously Evaluate Spectral Featureless Constituents in Soils**, *Soil.Sci.*, 159(4), PP. 259–270.
- Bishop, J.L., Pieters, C.M. & Edwards, J.O., 1994, **Infrared Spectroscopic Analyses on the Nature of Water in Montmorillonite**, *Clays and Clay Miner.* 42(6), PP. 702–716.
- Bresson, L.M., Le Bissonnais, Y., Andrieux, P., 2006, Soil surface crusting and structure slumping in Europe, In: Boardman, J., Poesen, J.(Eds.), *Soil Erosion in Europe*, Wiley & Sons Ltd, West Sussex, pp. 489–500.
- Brickleymer, R.S. & Brown, D.J., 2010, **On-the-go VisNIR: Potential and Limitations for Mapping Soil Clay and Organic Carbon**, *Comput.Electron.Agric.*, 70, PP. 209–216.
- Camargo, O.A., Moniz, A.C., Jorge, J.A. & Valadares, J.M., 2009, **Methods of Chemical, Mineralogical and Physical Analysis of Soils Used in the Pedology Section (Technical Bulletin n.106)**, Instituto Agronômico (IAC), Campinas.
- Casa, R., Castaldi, F., Pascucci, S., Palombo, A. & Pignatti, S., 2013, **A Comparison of Sensor Resolution and Calibration Strategies for Soil Texture Estimation from Hyperspectral Remote Sensing**, *Geoderma*, 197–198, PP. 17–26.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. & Hurburgh, C.R., 2001, **Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties**, *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 65, PP. 480–490.
- Chang, C.W. & Laird, D.A., 2002, **Near-Infrared Reflectance Spectroscopy Analysis of Soil C and N**, *Soil Science*, 167, PP. 110–116.
- Conforti, M., Buttafuoco, G., Leone, A.P., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G. & 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, PP. 44–58.
- Cook, R. & Weisberg, S., 1982, **Residuals and Influence in Regression**, John Wiley & Sons, New York.
- Cozzolino, D. & Moron, A., 2003, **The Potential of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy to Analyse Soil Chemical and Physical Characteristics**, *Journal of Agricultural Sciences*, 140, PP. 65–71.
- Curcio, D., Cirraolob, G., D'Asaroa, F. & Minacapillia, M., 2013, **Prediction of Soil Texture Distributions Using VNIR-SWIR Reflectance Spectroscopy**, *Procedia Environmental Sciences*, 19, PP. 494–503.
- Darvishzadeh, R., Atzberger, C., Skidmore, A. & Schlerf, M., 2011, **Mapping Grassland Leaf Area Index with Airborne Hyperspectral Imagery: A Comparison Study of Statistical Approaches and Inversion of Radiative Transfer Models**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, PP. 894–906.
- Demattê, J.A.M., 2002, **Characterization and Discrimination of Soils by their Reflected Electromagnetic Energy**, *Braz.J.Agric.Res.*, 37, PP. 1445–1458.
- Demattê, J.A.M. & Terra, F.S., 2014, **Spectral Pedology: A New Perspective on Evaluation of Soils along Pedogenetic Alterations**, *Geoderma* 217–218, PP. 190–200.
- Dunn, B.W., Beecher, H.G., Batten, G.D. & Ciavarella, S., 2002, **The Potential for Nearreflectance Spectroscopy for Soil Analysis—A Case Study from the Riverine Plain of South-Eastern Australia**, *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42, PP. 607–614.
- Ge, Y., Thomasson, J.A. & Morgan, C.L.S., 2014, **Mid-Infrared Attenuated Total Reflectance Spectroscopy for Soil Carbon and Particle Size Determination**, *Geoderma* 213, PP. 57–63.
- Geladi, P. & Kowalski, B.R., 1986, **Partial Least-Squares Regression: A Tutorial**, *Analytica Chimica Acta*, 185, PP. 1–17.

- Gomez, C., Le Bissonnais, Y., Annabi, M., Bahri, H. & Raclot, D., 2013, **Laboratory Vis-NIR Spectroscopy as an Alternative Method for Estimating the Soil Aggregate Stability Indexes of Mediterranean Soils**, *Geoderma*, 209-210, PP. 86-97.
- Gras, J.P., Barthès, B.G., Mahaut, B. & Trupin, S., 2014, **Best Practices for Obtaining and Processing Field Visible and Near Infrared (VNIR) Spectra of Topsoils**, *Geoderma*, 214-215, PP. 126-134.
- Greve, M.H., Kheir, R.B., Greve, M.B. & Bocher, P.K., 2012, **Quantifying the Ability of Environmental Parameters to Predict Soil Texture Fractions Using Regression-Tree Model with GIS and LIDAR Data: The Case Study of Denmark**, *Ecological Indicators*, 18, PP. 1-10.
- Hartemink, A.E. & Minasny, B., 2014, **Towards Digital Soil Morphometrics**, *Geoderma*, 230-231, PP. 305-317.
- Hillel, D., 1980, **Applications of Soil Physics**, Academic Press Inc.
- Hillel, D., 2004, **Introduction to Environmental Soil Physics**, Elsevier Academic Press, New York. ISBN: 0-12-348655-6, PP. 494.
- Huang, X.W., Senthilkumar, S., Kravchenko, A., Thelen, K. & Qi, J.G., 2007, **Total Carbon Mapping in Glacial till Soils Using Near-Infrared Spectroscopy, Landsat Imagery and Topographical Information**, *Geoderma*, 141, PP. 34-42.
- Islam, K., Singh, B. & McBratney, A., 2003, **Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultra-Violet, Visible, and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy**, *Soil Res.*, 41(6), PP. 1101-1114.
- Janik, L.J. & Skjemstad, J.O., 1995, **Characterisation and Analysis of Soils Using Mid-Infrared Partial Least Squares. II. Correlations with Laboratory Data**, *Australian Journal of Soil Research*, 33, PP. 637-650.
- Jindaluang, W., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., Singh, B.P. & Singh, B., 2013, **Influence of Soil Texture and Mineralogy on Organic Matter Content and Composition in Physically Separated Fractions Soils of Thailand**, *Geoderma*, 195-196, PP. 207-219.
- Kagan, T.P., Shachak, M., Zaady, E. & Karnieli, A., 2014, **A Spectral Soil Quality Index (SSQI) for Characterizing Soil Function in Areas of Changed Land Use**, *Geoderma*, 230-231, PP. 171-184.
- Khorram, S., Nelson, S.A.C. & Koch, F.H., 2012, **Remote Sensing**, Springer.
- Kuang, B., Mahmood, H.S., Quraishi, M.Z., Hoogmoed, W.B., Mouazen, A.M. & Van Henten, E.J., 2012, **Sensing Soil Properties in the Laboratory, In Situ, and On-Line: A Review: Advances in Agronomy**, Vol. 114, No. 2012, Elsevier Inc.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Madeira Netto, J. & Robbez-Masson, J.M., 2008, **Estimation of Soil Clay and Calcium Carbonate Using Laboratory, Field and Airborne Hyperspectral Measurements**, *Remote Sens. Environ.*, 112(3), PP. 825-835.
- Li, D., Durand, M. & 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 Sensing Environment*, 125, PP. 34-48.
- Lu, P., Wang, L., Niu, Z., Li, L. & Zhang, W., 2013, **Prediction of Soil Properties Using Laboratory VIS-NIR Spectroscopy and Hyperion Imagery**, *Journal of Geochemical Exploration*, 132, PP. 26-33.
- Matney, T., Barrett, L.R., Dawadi, M.B., Maki, D., Maxton, C., Perry, D.S., Roper, D.C., Somers, L. & Whitman, L.G., 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, PP. 315-324.

- McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L. & Minasny, B., 2003, **On Digital Soil Mapping**, *Geoderma* 117, PP. 3–52.
- McDowell, M.L., Bruland, G.L., Deenik, J.L., Grunwald, S. & Knox, N.M., 2012, **Soil Total Carbon Analysis in Hawaiian Soils with Visible, Near-Infrared and Mid-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy**, *Geoderma*, 189–190, PP. 312–320.
- Minasny, B. & Hartemink, A.E., 2011, **Predicting Soil Properties in the Tropics**, *Earth-Science Reviews*, 106, PP. 52–62.
- Nocita, M., Stevens, A., Noon, C. & Wesemael, B.V., 2013, **Prediction of Soil Organic Carbon for Different Levels of Soil Moisture Using Vis-NIR Spectroscopy**, *Geoderma*, 199, PP. 37–42.
- Quan, S.Z., Jie, S.Y., Li, P. & Gen, J.Y., 2013, **Mapping of Total Carbon and Clay Contents in Glacial Till Soil Using On-the-Go Near-Infrared Reflectance Spectroscopy and Partial Least Squares Regression**, *Pedosphere*, 23(3), PP. 305–311.
- Rawlins, B.G., Kemp, S.J. & 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, PP. 84–91.
- Rodger, A., Laukamp, C., Haest, M. & Cudahy, T., 2012, **A Simple Quadratic Method of Wavelength Tracking for Absorption Features in Continuum Removed Spectra**, *Remote Sensing of Environment*, 118, PP. 273–283.
- Sawut, M., Ghulam, A., Tiyyip, T., Zhang, Y.J., Ding, J.L., Zhang, F. & Maimaitiyiming, M., 2014, **Estimating Soil Sand Content Using Thermal Infrared Spectra in Arid Lands**, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, PP. 203–210.
- Shepherd, K.D. & Walsh, M.G., 2002, **Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties**, *Soil Science Society of America Journal*, 66, PP. 988–998.
- Shrestha, D.P., Margate, D.E., van der Meer, F. & Anh, H.V., 2005, **Analysis and Classification of Hyperspectral Data for Mapping Land Degradation: An Application in Southern Spain**, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, PP. 85–96.
- Small, C., Steckler, M., Seeber, L., Akhter, S.H., Goodbred Jr., S., Mia, B. & Imam, B., 2009, **Spectroscopy of Sediments in the Ganges–Brahmaputra Delta: Spectral Effects of Moisture, Grain Size and Lithology**, *Remote Sensing of Environment*, 113, PP. 342–361.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. & Wetterlind, J., 2010, **Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science**, In: Sparks, D.L.(Ed.), *Advances in Agronomy*, pp. 163–215.
- Stevens, A., Udelhoven, T., Denis, A., Tychon, B., Lioy, R., Hoffman, L. & Van Wesemael, B., 2010, **Measuring Soil Organic Carbon in Croplands at Regional Scales Using Imaging Spectroscopy**, *Geoderma*, 158, PP. 32–45.
- Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B. & Chittleborough, D., 2011, **Visible Near-Infrared Reflectance Spectroscopy as a Predictive Indicator of Soil Properties**, *Ecological Indicators*, 11, PP. 123–131.
- Vašát, R., Kodešová, R., Borůvka, L., Klement, A., Jakšík, O. & 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, PP. 208–218.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. & Skjemstad, J.O., 2006b, **Visible, Near Infrared, Mid Infrared or Combined Diffuse Reflectance Spectroscopy for Simultaneous Assessment of Various Soil Properties**, *Geoderma*, 131, PP. 59–75.

- Viscarra Rossel, R.A., Chappell, A., de Caritat, P. & McKenzie, N.J., 2011, **On the Soil Information Content of Visible-Near Infrared Reflectance Spectra**, Eur.J.Soil Sci., 62, PP. 442-453.
- Viscarra Rossel, R.A., McGlynn, R.N. & McBratney, A.B., 2006a, **Determining the Composition of Mineral-Organic Mixes Using UV-vis-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy**, Geoderma, 137, PP. 70-82.
- Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B. & Minasny, B., 2010, **Proximal Soil Sensing**, Springer, New York.
- Vohland, M., Ludwig, M., Thiele-Bruhn, S. & Ludwig, B., 2014, **Determination of Soil Properties with Visible to Near- and Mid-Infrared Spectroscopy: Effects of Spectral Variable Selection**, Geoderma, 223-225, PP. 88-96.
- Vohland, M., Besold, J., Hill, J. & Fründ, H.C., 2011, **Comparing Different Multivariate Calibration Methods for the Determination of Soil Organic Carbon Pools with Visible to Near Infrared Spectroscopy**, Geoderma 166, PP. 198-205.
- Volkan Bilgili, A., van Es, H.M., Akbas, F., Durak, A. & Hively, W.D., 2010, **Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy for Assessment of Soil Properties in a Semi-Arid Area of Turkey**, Journal of Arid Environments, 74, PP. 229-238.
- Waiser, T.H., Morgan, C.L.S., Brown, D.J. & Hallmark, C.T., 2007, **In Situ Characterization of Soil Clay Content with Visible Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy**, Soil Sci. Soc. Am. J., 71, PP. 389-396.
- Wang, Q., Li, P. & Chen, X., 2012, **Modeling Salinity Effects on Soil Reflectance under Various Moisture Conditions and its Inverse Application: A Laboratory Experiment**, Geoderma, 170, PP. 103-111.
- Xu, L., Xie, D. & Fan, F., 2011, **Effects of Pretreatment Methods and Bands Selection on Soil Nutrient Hyperspectral Evaluation**, Procedia Environmental Sciences, 10, PP. 2420 - 2425.
- Zhu, Y., David C.W. & Zhang, W., 2011, **Characterizing Soils Using a Portable X-ray Fluorescence Spectrometer-1. Soil Texture**, Geoderma, 167-168, PP. 167-177.