

تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران با استفاده از فناوری سنجش مجاورتی

مجید دانش^۱

روشنک درویش‌زاده^۲

حسینعلی بهرامی^۲

علی‌اکبر نوروزی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

چکیده

شن از مهم‌ترین اجزای بافت خاک است که برای عملیات مدل‌سازی زیست‌محیطی و پهنه‌بندی رقوم‌های خاک، باید مورد توجه واقع شود. از آنجا که این ویژگی، دستخوش تغییرپذیری‌های مکانی بوده، لذا تشخیص، پهنه‌بندی و پایش آن در مقیاس وسیع و با روش‌های نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی معمول، بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است. با ظهور فناوری مجاورت‌سنجی بازتابی (VNIR-DRS)، روزنه‌ای در بررسی این ویژگی خاک ایجاد شده است. طی تحقیق حاضر، از طیف‌سنجی بازتابی مجاورتی، برای بررسی اجزای شن در قسمت‌هایی از استان مازندران استفاده شد. جمعاً ۱۲۸ نمونه از عمق ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک، براساس روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده تصادفی و نیز 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 رگرسیون چندمتغیره PLSR و براساس روش اعتبارسنجی متقاطع و عملیات پیش‌پردازشی چون: میانگین‌گیری (روش کاهش داده‌های طیفی)، هموارسازی و مشتق اول طیفی براساس الگوریتم ساویتسکی-گولای، مدل نهایی با تعداد ۲ و ۴ عامل؛ به ترتیب: با همبستگی دوطرفه پیرسون (R_p) حدود ۰/۸۳ و ۰/۸۲، ضریب تبیین (R^2_p) حدود ۰/۶۸ و ۰/۶۷، میانگین مربعات خطای کالیبراسیون ($RMSE_p$) حدود ۸/۶۸ و ۸/۸۳، و نیز RPD_p تقریبی ۱/۷۸ و ۱/۷۵، $RPIQ_p$ تقریبی ۲/۴۵ و ۲/۴۱ (ست اعتبارسنجی مستقل)، به‌عنوان مطلوب‌ترین مدل به‌منظور برآورد مقادیر شن منطقه مورد مطالعه، شناخته شد که نتایج، نشان‌دهنده توانایی مناسب مدل در برآورد مقادیر شن منطقه بوده است. درنهایت، قابلیت فناوری مجاورت‌سنجی، در بررسی اجزای شن منطقه به اثبات رسید. همچنین، از این مدل و نیز دامنه‌های طیفی مؤثر به‌دست آمده می‌توان به‌عنوان مبنایی برای بررسی مقادیر شن در مقیاس بسیار وسیع، با عملیات پیش‌مقیاس‌سازی توسط داده‌های ابرطیفی هوایی-ماهواره‌ای، بهره برد. که این امر نشان‌دهنده اهمیت طیف‌سنجی مجاورتی در تشخیص طول‌موج‌های مفید و نیز ایجاد مدل، به‌منظور استفاده آن در داده‌های ماهواره‌ای، خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی متقاطع، پهنه‌بندی رقوم، سنجش مجاورتی، شن، PLSR

۱- استادیار حفاظت و فرسایش خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسئول) m.danesh@sanru.ac.ir

۲- استاد فیزیک، حفاظت و فرسایش خاک، دانشگاه تربیت مدرس، bahramih@modares.ac.ir

۳- دانشیار سنجش از دور و علوم اطلاعات زمین، دانشگاه توئنته، هلند، r.darvishzadeh@alumni.itc.nl

۴- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران noroozi.aa@gmail.com

۱- مقدمه

به خشکی، بسیار آسیب‌پذیرتر بوده، مقادیر آب کمتری در خود ذخیره کرده و همزمان با رشد گیاه، سریع‌تر آب خود را از دست می‌دهند (Miller 2004; Ray, 2001). همچنین، خاک‌های شنی، مقادیر عناصر غذایی کمتری را در خود دارند و به راحتی با حرکت آب در داخل این نوع خاک‌ها، مواد غذایی آن‌ها شسته می‌شود (Goncalves and Gartlye, 1994). بنابراین، اطلاع از مقادیر و نحوه توزیع مکانی اجزای شن، برای پایش و پهنه‌بندی مناطق مستعد به بیابان‌زایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده (Kosmas et al., 2006) که نیاز مبرم به اطلاعات به‌روز، به‌هنگام و دقیق از این پارامترهای خاک، را در بسیاری از تحقیقات ایجاد می‌کند (Sawut et al., 2014) از طرفی؛ تجزیه، تحلیل و نقشه‌بندی خصوصیات بافتی خاک در مقیاس‌های وسیع، مستلزم کارهای میدانی انرژی‌بر، پرهزینه و روش‌های آزمایشگاهی دشوار است که غالباً وقت‌گیر هستند (Abdu et al., 2008; Hewson et al., 2012).

به‌تازگی، برخی محققان، استفاده از تابش‌های منعکس شده از سطح خاک را به‌عنوان شیوه جایگزین برای ارزیابی و تعیین خصوصیات فیزیک و شیمیایی خاک عنوان کرده‌اند (Aichi et al., 2009; Stenberg et al., 2010; Conforti et al., 2013) دانش و همکاران، (۱۳۹۵). طبق این روش، مشخص شده که تغییرات در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی خاک‌ها، سبب ایجاد پدیده‌های طیفی بارزی (DSFs) می‌شود، که به‌طور قطع، از طریق طیف‌سنجی بازتابی در دامنه طیفی ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر (VNIR: مرئی- مادون قرمز نزدیک)، قابل شناسایی و آشکارسازی خواهند بود (Stenberg et al., 2010; Conforti et al., 2013). مشخص شده است که طیف‌های بازتابی خاک، به‌شدت تحت تأثیر بسیاری از خصوصیات همچون: بافت، رطوبت، ماده آلی و آهک خاک است (Aichi et al., 2009; Schwanghart and Jarmer, 2011; Stevens et al., 2008) دانش و همکاران، (۱۳۹۵)، به این ترتیب؛ سنسجش آزمایشگاهی در محل بازتاب خاک؛ در دامنه طیفی VNIR (مرئی-مادون قرمز نزدیک)، به‌عنوان ابزاری امیدبخش در

خاک‌ها ترکیبات پیچیده پویا از نظر زمانی و مکانی می‌باشند که لازم است برای ارزیابی کیفیت آن‌ها خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی زیادی را مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور باید تعداد نمونه‌های زیادی برداشت نموده و وقت، دقت و هزینه زیادی را صرف کارهای آزمایشگاهی کرد (Anne et al., 2014). از طرفی؛ تشخیص و شناسایی دقیق پارامترهای خاک، لازمه مدیریت موفق و پایدار در سامانه آب-خاک-گیاه می‌باشد (Kuang et al., 2012). لذا، مدیریت پایدار خاک، نیازمند اطلاعات به‌هنگام، دقیق و مورد اعتماد از خصوصیات خاک بوده که نشان‌دهنده و تعیین‌کننده کاربری خاک، نیز خواهد بود (Kempen et al., 2012; Sawut et al., 2014).

خصوصیات فیزیکی خاک همچون: بافت، ساختمان، تراکم، تخلخل، استحکام و پایداری، دما، رنگ و مقاومت، در ارتباط تنگاتنگ با همدیگر بوده و در زمینه‌هایی همچون: مدل‌سازی فرسایش خاک، ارزیابی تناسب محصولات، پایش تنزل خاک و تخمین خطرهای زیست‌محیطی، بسیار مورد کاربرد قرار می‌گیرند (Goldshleger et al., 2010; Sawut et al., 2014; دانش و همکاران، ۱۳۹۵). از بین پارامترهای مذکور؛ بافت خاک، یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر پایداری خاک‌واحدها بوده (Jong et al., 2011)، که بر تشکیل سله و پوسته سطحی خاک نیز تأثیر بسزایی دارد (Bresson et al., 2006).

بافت، بر بسیاری از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و نیز رفتارهای خاک (SBS)، همچون: ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی، هدایت هیدرولیکی (HC)، شکنندگی و مقاومت به عملیات کاشت، اثرگذار است (Greve et al., 2012). توزیع مکانی و تغییرپذیری اجزای مختلف بافت خاک (STFs)، به‌طور فزاینده‌ای، به‌عنوان ورودی به مدل‌های اکولوژیکی، هیدرولیکی، اقلیمی و دیگر مدل‌های زیست‌محیطی، مورد نیاز است (Greve et al., 2012). از بین اجزای بافت خاک، جزء شن، دارای رابطه بسیار نزدیکی با کیفیت خاک می‌باشد (Andrade et al., 2013). به‌طوری که؛ خاک‌های شنی نسبت

نیاز به آماده‌سازی نمونه، بوده و می‌تواند به‌عنوان روشی جایگزین و یا مکمل برای متدهای آزمایشگاهی سنتی خاک باشد (Zornoza et al., 2008). این تکنیک (DRS)، از امضاهای طیفی مواد به‌دلیل انتقالات الکترونی اتم‌ها، خمش و کشش ارتعاشی گروه‌های عاملی^۲ که مولکول‌های مواد را تشکیل می‌دهند، بهره می‌برد (Shepherd and Walsh, 2002).

قسمت اعظم فرآیند انتقالات الکترونی توسط نور مرئی و طول‌موج‌های کمتر، تحریک و برانگیخته می‌شوند. درحالی که، قسمت غالب ارتعاشات بنیادین^۳، توسط امواج مادون قرمز میانی (MIR) تحریک می‌شوند، که علائم فرعی و ترکیبی^۴ آن در بخش مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه (NIR/SWIR) طیف الکترومغناطیس آشکار می‌شود، که این امر اساساً به‌دلیل: حضور پیوندهای O-H، N-H و C-H می‌باشد (Li, 2006; Xian-Li et al., 2012). اجزای تشکیل‌دهنده مواد براساس پدیده‌های جذبی مشخص^۵، در طول‌موج‌های الکترومغناطیس، قابل تعیین شده‌اند و نیز پدیده‌ها و امضاهای طیفی مواد براساس جذب آن‌ها (یا بازتاب)، به‌عنوان تابعی از طول‌موج تعریف می‌شود. این تکنیک، برای مواد پودری غیرشفاف، همچون نمونه‌های خاک، روشی کارآمد و ساده برای سنجش پدیده‌های جذبی طیفی (SAFs) است. زیرا از فرآیند پراکنش نوری پیشرفته^۶ بهره می‌برد (Pasikatan et al., 2001) و نیازی به عملیات آماده‌سازی پیچیده نمونه‌ها نخواهد داشت (Xian-Li et al., 2012; دانش و همکاران، ۱۳۹۵). بر این اساس، طیف تابشی الکترومغناطیس^۷، در دامنه‌های مرئی (Vis) و مادون قرمز نزدیک/موج کوتاه (NIR/SWIR)، حاوی اطلاعات مفیدی در مورد اجزای تشکیل‌دهنده خاک و خصوصیات آن‌ها می‌باشد که با تکنیک‌های تحلیلی خاصی قابل آشکارسازی و بارزسازی خواهند بود (Xian-Li et al., 2012). به‌طوری که پدیده‌های جذبی مرتبط

تعیین خصوصیات خاک می‌باشد که دارای مزایایی همچون: سرعت و چالاکتی، غیرتخریبی بودن، به‌صرفه از نظر هزینه و عدم استفاده از مواد شیمیایی خطرناک است. همچنین، چندین ویژگی به‌طور همزمان و با یک اسکن ساده طیفی بازتابی، قابل تعیین و برآورد خواهد بود (Conforti et al., 2013).

فناوری طیف‌سنجی بازتابی پراکنشی آزمایشگاهی^۱

در سال ۱۹۸۱، (Stoner and Baumgardner, 1981) پنج شکل منحنی بازتاب طیفی خاک را براساس تنوع بازتاب‌های خاک، در دامنه وسیعی از خاک‌های سطحی طبیعی، تشخیص دادند. این منحنی‌ها براساس شکل و وجود پدیده‌های جذبی طیفی، که بیانگر اجزای بافت، ماده آلی و اکسیدهای آهن بودند، مورد شناسایی قرار گرفتند. پس از چندین دهه، مشخص شد که بسیاری از خصوصیات خاک، همچون اجزای بافت خاک، می‌توانند با تحلیل طیفی نمونه‌های خاک، تحت شرایط طیف‌سنجی بازتابی، سنجیده شوند (Hahn and Gloaguen, 2008; Minasny et al., 2008; Nanni and Demattè, 2006). زیرا، طیف‌سنجی هوایی و فضایی (دورسنجی)، در مقایسه با طیف‌سنجی آزمایشگاهی و میدانی (LS/FS) دارای مشکلاتی می‌باشد، همچون: تأثیرات اتمسفری (Richter and Schläpfer, 2002)، تأثیرات ساختاری و ساختمانی، قدرت تفکیک مکانی و طیفی کمتر، اعوجاج و انحرافات هندسی، و نیز اختلاط طیفی پدیده‌ها (Mulder et al., 2011).

طی تحقیق انجام شده توسط (Demattè and Garcia (1999)، بازتاب‌های طیفی خاک را براساس پارامتر بافت و مقادیر آهن، به وضعیت هوادیدگی خاک‌های توسعه‌یافته از سنگ‌های بازالتی مرتبط ساختند. تحقیقات در این زمینه، نشان داد که تحت شرایط طیفی آزمایشگاهی، چندین خصوصیت خاک می‌تواند به‌طور همزمان توسط تحلیل‌های طیفی تعیین و برآورد شود (Mulder et al., 2011). استفاده از فناوری VNIR-DRS (۲۵۰۰-۳۵۰ nm)، کم‌هزینه و بدون

2- vibration stretching and bending of structural groups

3- fundamental vibrations

4- overtones and combinations

5- selective absorption feature

6- the enhanced light scattering phenomenon

7- the EM radiation spectrum

1- Lab-VNIR/SWIR Diffuse Reflectance Spectroscopy

تعداد، حاکی از تأثیر بارز بافت بر طیف‌های انعکاسی است. نقش اجزای بافت (دانش و همکاران، ۱۳۹۵)، به‌ویژه، مقادیر شن (کوارتز و فلدسپار) بر بازتاب‌های طیفی، بسیار مهم بیان شده است (Stevens et al., 2013).

تحقیق انجام شده توسط (Islam et al., 2003) نشان داد، اندازه ذرات و نیز اجزای بافت خاک، به‌دلیل تأثیر پراکنشی نور، در باندهای بازتابی ۱۹۰۰ و نیز محدوده ۲۰۰۰ الی ۲۲۰۰ نانومتر، بسیار حساس بوده و براساس این محدوده و طول‌موج‌ها، قابل شناسایی و مطالعه می‌باشند (Kagan et al., 2014).

همچنین مطالعات (Ge et al., 2014)، با هدف بررسی کارایی طیف‌های "بازتاب رقیق‌شده کل" (ATR)، در تعیین اجزای بافت، نشان داد که تخمین اجزای شن به‌طور رضایت‌بخشی با $R^2=0.88$ و $RPD<3$ ، قابل انجام است. این شیوه، فواید هر دو تکنیک: بازتاب پراکنشی (VNIRS) حداقل آماده‌سازی نمونه و عملکرد تحلیلی بالا) و بازتاب پراکنشی مادون قرمز میانی (MIRS)، عملکرد بهتر مدل‌ها) را باهم ترکیب کرد.

(Brown et al., 2006)، با به‌کاربردن فناوری VNIR-DRS آزمایشگاهی، برای دامنه‌ای از نمونه‌های خاک آمریکا، اروپا، آفریقا، و آسیا؛ به توسعه و ایجاد مدل سراسری در تخمین برخی خصوصیات خاک همچون اجزای بافت، پرداختند. براساس مطالعات (Barnes and Baker, 2000)، طیف‌های بازتابی دورسنجی شده، برای کمک به پهنه‌بندی بافت خاک سطحی در تفکیک مکانی بالا (2-5m)، در مقیاس مزرعه به‌کار برده شده و همچنین در برخی مناطق، با استفاده از سنجنده‌های هوابرد این کار انجام شده است (Gomez et al., 2008; Lagacherie et al., 2008; Selige et al., 2006).

تحقیق صورت گرفته توسط (Rawlins et al., 2011)، به تخمین توزیع اندازه ذرات (PSD) براساس فناوری مجاورت‌سنجی در خاک‌های با انواع مختلف مواد مادری، به‌ویژه خاک‌هایی که به‌طور مستقیم از سنگ بستر و یا مواد مادری انتقالی ایجاد شده، پرداخته است. ایشان نشان دادند،

با انتقالات الکترونی یون‌های Fe^{+2} و Fe^{+3} در کانی‌های مختلف، می‌تواند در محدوده طیفی مرئی (380-780nm) و یا مادون قرمز نزدیک (780-1000nm) یافت شود و نیز پدیده‌های جذبی مرتبط با ارتعاشات مولکولی گروه‌های عاملی آلی و غیرآلی ($metal-OH, CO_3^{-2}, H_2O$) در مواد آلی، سیلیکات‌ها، کربنات‌ها، و آب می‌توانند در دامنه طیفی NIR (780-2500nm) یافت شوند (Ben-Dor, 2002; Eisele et al., 2012).

همچنین، مواد آلی خاک دارای باندهای جذبی وسیعی در منطقه مرئی است که غالباً توسط رنگدانه‌ها و تیرگی ماده آلی ایجاد می‌شود (Stenberg et al., 2010). لذا، ویژگی‌های زیادی از خاک وجود دارد که در تحقیقات مختلف، امکان بررسی و تخمین آن‌ها توسط فناوری VNIR-DRS گزارش شده است. همچون کانی‌های خاک، بافت خاک، رطوبت، مواد آلی، خصوصیات بیولوژیکی، ظرفیت تبادل، عناصر فلزی و نیز بقایای سمی و خطرناک می‌باشد (Brown et al., 2006; Madari et al., 2006; Bengtsson et al., 2007; Viscarra Rossel et al., 2009).

در تحقیقات مبتنی بر کاربرد فناوری مجاورت‌سنجی در ارزیابی ویژگی‌های خاک، نحوه پیش‌تیمار مناسب داده‌ها و استراتژی‌های عملیات و اسننجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Chang et al., 2001; Chabrilat et al., 2013). به‌طور کلی؛ طیف بازتاب پراکنشی مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) حاصل از نمونه‌های خاک، شامل اطلاعاتی از مقادیر فازهای معدنی است که خاک حاوی آن است.

به‌نظر می‌رسد که هر فاز معدنی یا پوشش‌های معدنی؛ پوشش‌های اکسیدهای آهن بر روی سیلیسیم (Scheidegger et al., 1993) و یا مینرال‌های رسی (Carroll, 1958)؛ به‌طور بارز و غالب، در یکی از بخش‌های اندازه ذرات رخ می‌دهند (هر کدام از اجزای بافت همچون شن، از یک نوع کانی (غالب) تشکیل شده است) و بر این اساس می‌توان به مطالعه اجزای بافت خاک با تکنیک مجاورت‌سنجی پرداخت (Rawlins et al., 2011). تعداد اندکی مطالعات در زمینه تأثیر اجزای بافت بر بازتاب طیفی خاک صورت گرفته، که همین

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (...)

تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران با استفاده از فناوری ... / ۶۷

از خاک‌های جغرافیایی مناطق مختلف، نمونه‌برداری انجام شود (Summers et al., 2011). لذا براساس اطلاعات مختلف زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی (باغ، شالیزار، زراعی، مرتع و جنگل) و نقشه راه‌ها، تعداد ۱۲۸ نمونه و براساس روش طبقه‌بندی شده تصادفی (Kagan et al., ۲۰۱۴)، از ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک بخش‌های مختلف استان مازندران (به وسعت استان)، جمع‌آوری و موقعیت مکانی آن‌ها توسط جی‌پی‌اس دستی (Garmin Montana 650)، با دقت تقریبی چهار متر، ثبت شد (نگاره ۱).

در آزمایشگاه خاک‌شناسی، پس از عملیات خرد کردن کلوخه، هوا خشک شدن و رد شدن از الک دو میلی‌متری، هر نمونه به دو قسمت تقسیم شد: قسمت اول برای تعیین نسبت اجزای شنی بافت، با استفاده از روش هیدرومتر (Camargo et al., 2009) تخصیص داده شد و قسمت دوم نیز، به آزمایشگاه طیف‌سنجی (اتاق تاریک)، برای تحلیل و سنجش‌های طیفی منتقل شدند.

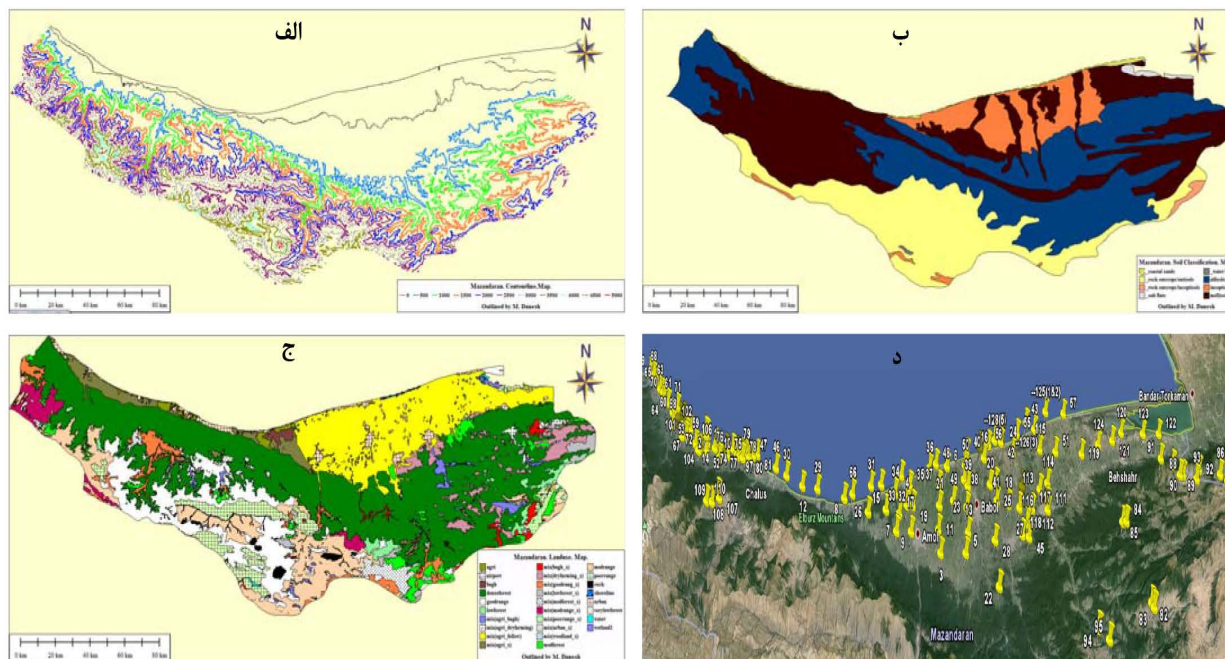
استفاده از مدل‌های آماری برای تخمین اجزای بافت خاک با استفاده از تکنیک VNIR-DRS، بر مبنای نوع مواد مادری آن‌ها، در برخی مناطق، می‌تواند سبب سهولت در حصول نتایج، شود (Rawlins et al., 2011).

بر مبنای مطالب فوق، هدف از تحقیق حاضر، بررسی رفتارها و علائم طیفی اجزای شن بافت خاک، به‌عنوان فاکتور غالب طیفی و نیز ارزیابی پتانسیل سنجش مجاورتی مرئی-مادون قرمز نزدیک و موج‌کوتاه (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر)، در آشکارسازی پارامترهای مذکور خاک، با بهره‌گیری از روش‌های آنالیز پیشرفته طیفی-آماری، برای تعیین و تخمین مقادیر آن‌ها، در بخش‌هایی از خاک استان مازندران بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- عملیات نمونه‌برداری

قبل از انجام تحلیل‌های طیفی، برای دستیابی به تغییرپذیری و تنوع مطلوب اجزای شن بافت خاک، باید



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

۲-۲- چیدمان آزمایشگاه مجاورت سنجی

طیف‌ها با استفاده از یک دستگاه تحلیل طیفی اسپکترومتر (ASD) واقع در اتاق تاریک، سنجیده شدند. دستگاه ASD از سه طیف‌سنج مجزا برای سنجش و اندازه‌گیری رادیانس بین طول‌موج‌های ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، بهره می‌برد. طیف‌سنج مرئی - مادون قرمز نزدیک (۱۰۵۰-۳۵۰ نانومتر)؛ از یک آرایه فوتودیودهای سیلیکونی ۵۱۲ کاناله، که در ادغام با یک فیلتر جداسازی بوده و امکان قدرت تفکیک طیفی اسمی ۳ نانومتر (FWHM) در دامنه مرئی را فراهم می‌کند.

بخش مادون قرمز موج کوتاه (۲۵۰۰-۹۰۰ نانومتر)؛ توسط دو طیف‌سنج اسکن‌کننده، با استفاده از آشکارسازهای آرسنایدی با نرخ اسکن ۱۰۰ میلی ثانیه، و قدرت تفکیک طیفی اسمی ۱۰ الی ۱۲ نانومتر، بهره می‌برد. البته در این دامنه‌ها، طیف‌ها با قدرت تفکیک ۱ نانومتر، مجدداً نمونه‌برداری می‌شوند (به‌طور خودکار و توسط پردازشگر مرکزی). علائم تابشی از طریق فیبرهای نوری^۱ با میدان دید اسمی مخروطی، ۲۵ درجه (بدون پیش‌سنجنده^۲) جمع‌آوری شدند. برای هر طیف خروجی، ۲۵ طیف منفرد (زیرطیف^۳) با فواصل اثنایه‌ای، میانگین‌گیری شدند.

طیف‌های تابشی (رادیانس) با استفاده از پنل مرجع سفید اسپکترون^۴ برای تولید طیف‌های بازتابی نسبی، مورد نرمال‌سازی قرار گرفتند. برای تمامی سنجش‌ها، از یک چیدمان آزمایشگاهی معمول استفاده شد؛ که براساس 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. پایداری زمانی^۵ لامپ و دستگاه طیف‌سنج، با پایش تغییرپذیری سنجش‌های متوالی^۶، از بازتاب مرجع استاندارد سفید (اسپکترون)، تأیید و تصدیق شد. در طول مراحل آزمایش، نوسانات زمانی منبع نوری در بازه طیفی مورد بررسی، وجود نداشته است.

برخی از نویزهای موقتی و طیفی در طول موج‌هایی خارج از این دامنه (در دامنه‌های انتهایی^۷)، مشاهده شده (به نگاره ۲-الف و نگاره ۴ دقت شود؛ قسمت‌های انتهایی طیف‌های بازتابی: اعوجاجات اندک طیفی در دامنه ۳۵۰ الی ۳۷۰ و اعوجاجات شدید طیفی در محدوده ۲۶۶۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، حضور دارند)؛ که دلیل آن: انرژی خروجی پایین لامپ در طول موج‌های UV و SWIR بوده است (Small et al., 2009). همچنین در برخی نمونه‌ها، افت نسبی ابزاری در طیف‌ها مشاهده شد که بین طیف‌سنج VNIR و SWIR1 در حدود ۱۰۰۰ نانومتر بوده است (به نگاره ۲-الف و نگاره ۴ دقت شود، مرز تقریبی ۱۰۰۰ نانومتر، دارای ناپیوستگی طیفی است). در غالب نمونه‌ها، این عامل سبب بیش از ۲٪ آفست در نقطه تلاقی دو طیف‌سنج، در مرز طیفی تقریبی ۱۰۰۰ نانومتر شده است (دانش و همکاران، ۱۳۹۵ Small et al., 2009). (نگاره ۲-الف).

۲-۳- شیوه طیف‌سنجی بازتابی

هر نمونه خاک هوا خشک، در یک پتری‌دیش به قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر قرار داده شده و با کاردک سطح آن هموار گردید و سپس برای بررسی‌های طیفی به اتاق تاریک منتقل شدند. ضخامت تمامی نمونه‌ها بیش از ۱۰ میلی‌متر بوده است، که بیش از ضخامت طیفی قابل سنجش تئوریک برای بزرگ‌ترین اندازه ذرات (برمبنای اجزای بافت) بوده است (Liang, 1997).

5- temporal stability

6- changeability monitoring of subsequent measurements

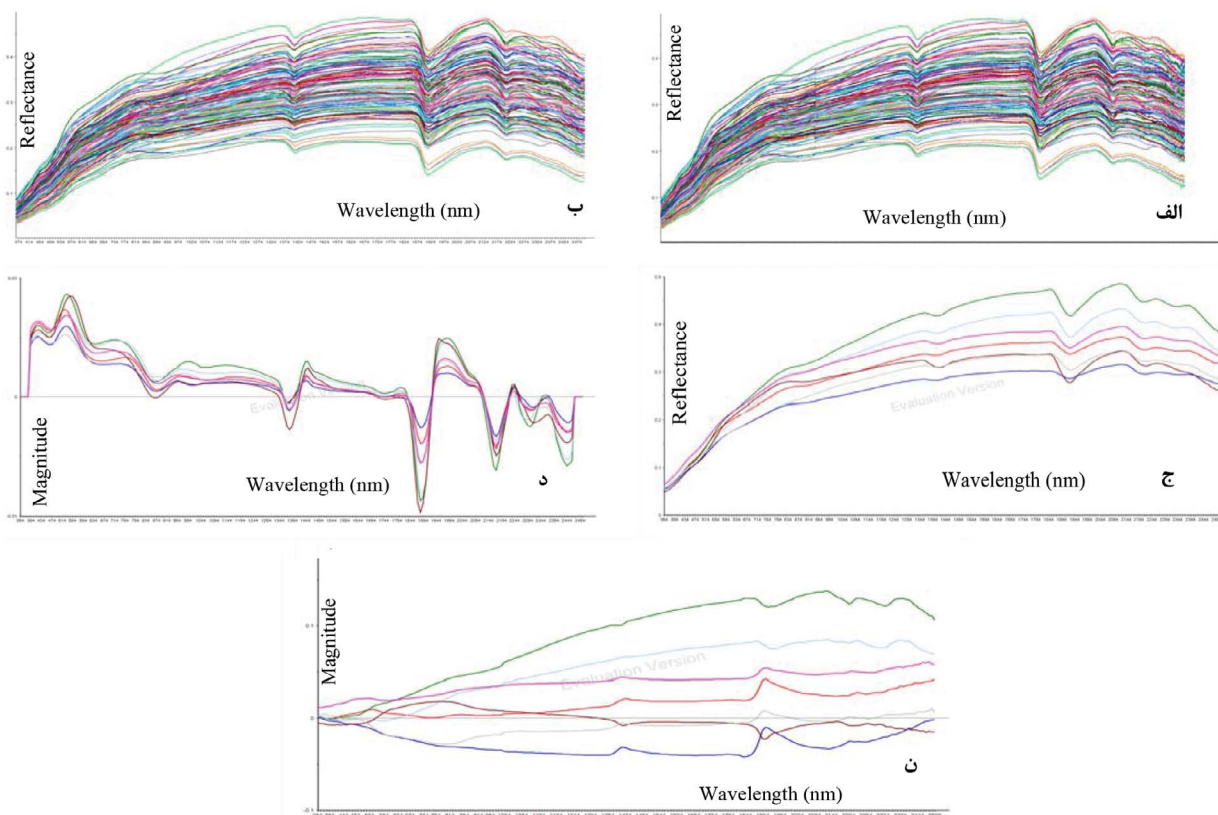
7- extremities

1- fiber-optic

2- foreoptic

3- sub-spectrum

4- Spectralon standard white reference



نگاره ۲: الف) طیف‌های خام، ب) طیف‌های میانگین‌گیری شده به‌ازای هر ۱۰ نانومتر، ج) چند طیف نمونه تحت عملیات هموارسازی SG، د) چند طیف نمونه تحت عملیات مشتق اول SG، ن) عملیات مرکز‌گیری طیفی (بر روی چند طیف نمونه) (محور عمودی: مقدار بازتاب؛ محور افقی: طول موج (nm))

انعکاس طیفی، بهره برده شد (به‌همراه عملیات بهینه‌سازی عملکرد سنجنده طیفی^۳). کیفیت طیف‌های سنجنده شده، به‌طریق بصری در دو مرحله: اول توسط نرم‌افزار اختصاصی دستگاه ASD (RS³) و دوم: توسط نرم‌افزار تحلیل بصری ViewSpecPro 6.2 مورد بازبینی قرار گرفت (نگاره ۴).

در صورت وجود نویزهای تصادفی، عملیات طیف‌سنجی مجدداً انجام می‌شد. بنابراین، میانگین ۲۵ طیف بازتابی متوالی به‌ازای هر چرخش ۹۰ درجه‌ای نمونه‌ها برای پرهیز از خطاهای طیفی ناشی از تأثیر اندازه ذرات، آثار سایه، زبری سطح و نیز هندسه تابش، برای انجام تحلیل‌های آماری- طیفی به‌کار گرفته شد. به‌طور خلاصه، با این روش، نمونه‌های خاک، اسکن شده و بازتاب‌های مطلق در دامنه طیفی ۳۵۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر

عدم حساسیت و عدم بازتاب کاغذ مشکی زیرین نمونه‌ها، با تغییرات وضوح پس‌زمینه (اسپکترالون در مقایسه با کاغذ مشکی زیرین) تأیید شد. هر نمونه برای چهار بار (به‌ازای هر چرخش ۹۰ درجه‌ای متوالی)، برای حذف آثار تغییر در هندسه تابش^۱، مورد سنجش طیفی قرار گرفت. زیرا، هندسه تابش قادر است بر تابع توزیع بازتاب دووجهته (BRDF) اثر بگذارد، بنابراین لازم است که آثار تغییر هندسه تابش بر بازتاب‌های سنجش شده، به حداقل خود برسد (Small et al., 2009). قبل از آغاز نمونه‌برداری طیفی، از گزینه جریان تاریک^۲، برای افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نیز از مرجع سفید اسپکترالون، به‌طور تقریب، به‌ازای هر نیم ساعت نمونه‌برداری طیفی، برای کالیبره کردن

1- radiance/viewing geometry

2- DC process

3- sensor efficiency optimization

مقاطع^۴ تعیین می‌شوند. بنابراین، رگرسیون حداقل مربعات جزئی، تعداد وسیعی از متغیرهای طیفی هم‌خط^۵ را که دارای خودهمبستگی^۶ اند، به تعداد کمی متغیرهای پنهان غیرهمبسته^۷ می‌کاهد، درحالی که سبب افزایش هم‌تغییرپذیری متغیرهای مورد بررسی می‌شود (Geladi and Kowalski, 1986; Darvishzadeh et al., 2011; دانش و همکاران، ۱۳۹۵).

متغیرهای پنهان (LV)، حاوی اطلاعات اندازه‌گیری شده طیفی بوده و از آن‌ها برای برآورد متغیر وابسته مورد نظر (در این تحقیق، مقادیر شن)، استفاده می‌شود. همچون دیگر روش‌های واسنجی خطی، هدف شیوه^۸ PLSR نیز ساخت و ایجاد یک مدل خطی می‌باشد:

$$Y = XB + \varepsilon \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن Y : بردار مرکزیابی شده متغیرهای پاسخ^۹ (پارامتر مقادیر شن خاک)؛ X : ماتریس مرکزیابی شده تخمین‌گرها^{۱۰} (طیف‌های بازتاب‌شده)؛ β : ماتریس ضرایب؛ و ε : ماتریس باقیمانده‌ها^{۱۰} است (Geladi and Kowalski, 1986; Darvishzadeh et al., 2011). لازم به ذکر است، این الگوریتم در محیط Unscrambler 10.4 انجام شده است.

۲-۵- عملیات پیش‌پردازش طیفی (spectral preprocessing)

برای کاهش آثار نویز و تداخلات ناشی از تجهیزات نوری (هندسه تابش و نویز منبع نوری)، داده‌های طیفی خام (نگاره ۲-الف)، به ازای هر ۱۰ نانومتر، به‌طور یکنواخت، مجدداً نمونه‌برداری شدند (نگاره ۲-ب)، این درحالی بود که، قدرت تفکیک طیفی آن‌ها در حد بالایی نگاه داشته شد (Kagan et al., 2014). لذا 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

و با قدرت تفکیک طیفی خروجی ۱ نانومتر، سبب تولید ۲۱۵۱ نقطه - داده طیفی (SDP) به ازای هر نمونه خاک، شد (دانش و همکاران، ۱۳۹۵).

۲-۴- تحلیل آماری - طیفی

هدف از تحلیل آماری-طیفی، تعیین این فرض است، که آیا طیف‌های بازتابی به‌دست آمده از نمونه‌های خاک می‌توانند برای برآورد مقادیر شن خاک استفاده شوند یا خیر؟ برای تشخیص محدوده‌های طیفی مؤثر (طول‌موج‌های پرنفوذ) در برآورد، نیز این تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Summers et al., 2011).

روش PLSR (رگرسیون حداقل مربعات جزئی)، از معمول‌ترین روش‌های آماری شیمیایی-سنجی چندمتغیره است که برای کالیبراسیون طیفی و تخمین خصوصیات خاک، به‌کار برده می‌شود (Gomez et al., 2013). روش PLSR، سبب استخراج ترکیبات خطی متوالی از تخمین‌گرها می‌شود، که به‌طور مطلوبی، اهداف ترکیبی مربوط به واریانس توصیفی پاسخ^۱ و واریانس توصیفی تخمین‌گر^۲ را مورد بررسی قرار می‌دهد. در نتیجه، تکنیک PLSR سبب تعادل و توازن بین دو هدف: تغییرات پاسخ و تغییرات تخمین‌گر خواهد شد (Minansy and Hartemink, 2011). این روش، از طریق بهره‌گیری از تکنیک‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)، بر مشکلات چندمتغیره خطی و خودهمبستگی^۳ بین متغیرهای طیفی و نمونه‌ها، غلبه می‌کند. همچنین، PLSR، یک سری از اجزا یا بردارهای پنهان (LVs) را می‌یابد که سبب کاهش هم‌زمان و یا تجزیه ماتریس متغیرهای طیفی تخمین‌گر (X) شده و تا جای ممکن سبب همبستگی بین متغیرهای پاسخ (Y) با متغیرهای مستقل (X) می‌شود (Summers et al., 2011). سپس با عملیات رگرسیون، Y توسط متغیرهای تعدیل شده^۴ X ، برآورد می‌شود و نیز، تعداد بردارهای پنهان، براساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی

4- CV-operation

5- collinear/intercorrelated spectral variables

6- non-correlated LVs

7- the mean-centered vector of the response variable

8- the mean-centered matrix of the predictor

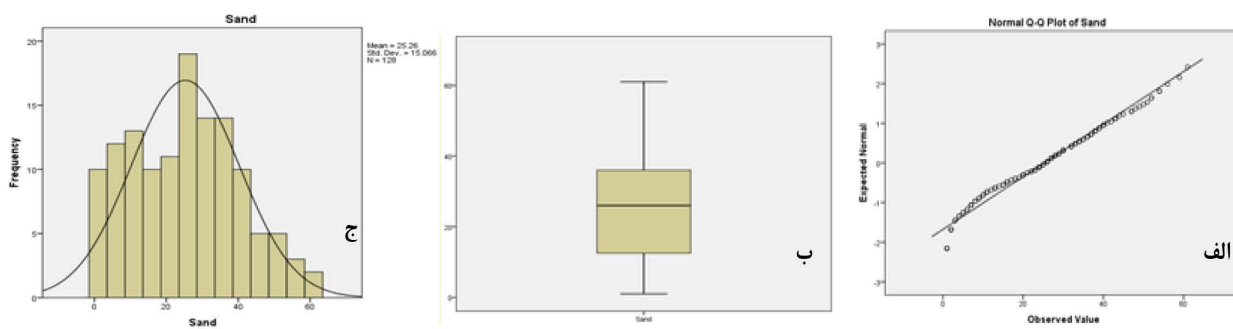
9- the matrix of coefficients

10- the matrix of residuals

1- Y-explained variance

2- X-explained variance

3- autocorrelation/multi-collinearity



نگاره ۳: الف) آزمون Q-Qplot برای تشخیص توزیع نرمال و داده پرت در اجزای شن؛ ب) Boxplot برای تشخیص داده پرت شن؛ ج) منحنی توزیع نرمال منطبق بر هیستوگرام توزیع شن

اطلاعاتی مذکور، برای تغییرات مناسب این ویژگی، صحیح بوده است. همچنین مقادیر کمینه و بیشینه آن به ترتیب، ۱٪ و ۶۱٪ بوده است.

براساس آزمون نرمال کولموگروف-اسمیرنوف و نیز تست Q-Q plot و Box-plot مشخص شد که توزیع مقادیر شن نرمال بوده و فاقد داده پرت می‌باشد (نگاره ۳). همچنین براساس جدول توصیف آماری (جدول ۱)، نیز می‌توان براساس نزدیکی مقادیر میانگین، میانه و مد، پی به نرمال بودن داده‌ها برد. البته براساس خصوصیات توزیع^۶، این پارامتر خاک، دارای کشیدگی و کمی چولگی، نیز بوده است (جدول ۱).

۳-۲- خصوصیات منحنی بازتاب خاک (SSRC)

همانطوری که توسط Demattê (۲۰۰۲) بیان شد، باید سه موضوع اصلی "منحنی طیفی"، برای آشکارسازی تغییرات کیفی آن مد نظر قرار گیرد: شدت بازتاب (آلبیدو)، پدیده‌های جذبی (عمق و قدرت) و شکل طیف. به‌طور کلی، رفتار طیفی خاک، در امتداد مناطق مختلف نمونه‌برداری، دارای تغییراتی است (به‌دلیل ترکیب پارامترهای مختلف خاک و نیز تغییرات خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی الفاء شده توسط فرآیندهای خاکزایی -نگاره‌های ۲ و ۴: اختلاف بین منحنی‌های طیفی نمونه‌های جمع‌آوری شده). همچنین، تغییرات در شدت بازتاب، غالباً به‌دلیل تفاوت

حجم داده‌ها، یاد می‌شود. همچنین برای هموارسازی و کاهش نویزهای تصادفی و موقتی، از فیلتر هموارساز SG مرتبه ۲ به‌همراه ۳ نقطه هموارساز^۲ (چپ و راست) و نیز هسته تقارنی^۳ بهره گرفته شد (نگاره ۲-ج). همچنین طیف‌های خام و هموارسازی شده، توسط تحلیل مشتق اول^۴ (نگاره ۲-د) و نیز عملیات مرکزگیری (نگاره ۲-ن)، مورد آزمون قرار گرفتند. از فرآیند اعتبارسنجی متقاطع^۵ برای کل نمونه‌ها، به‌منظور تعیین پیش‌پردازش مطلوب، استفاده شد (Casa et al., 2013). نتایج آن‌ها براساس میزان میانگین مربعات خطا (RMSEcv) و ضریب تبیین (R²cv) و نیز انحراف (bias)، مورد مقایسه قرار گرفت که برای آزمون انحراف، از روش «Student t-test» بین جفت‌های مشاهده‌ای و تخمینی، استفاده شده است (Casa et al., 2013).

۳- نتایج

۳-۱- آنالیز آماری نمونه‌ها

آنالیز واریانس مقادیر شن نمونه‌ها (جدول ۱ و نگاره ۳)، مشخص کرد که مقادیر شن دارای ضریب تغییرات ۵۹/۷٪ بوده و با دامنه ۶۰٪ از تغییرات مناسبی برخوردار بوده است. بنابراین تلاش برای نمونه‌برداری براساس لایه‌های

6- statistical distribution properties

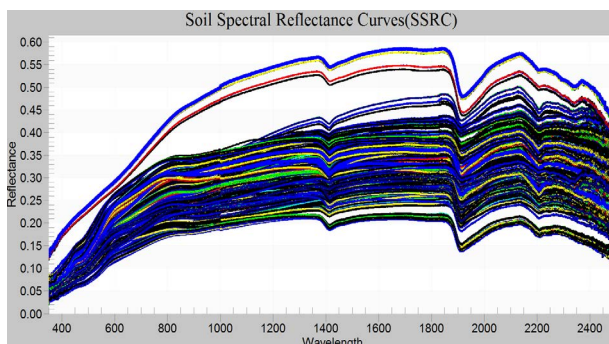
1- dimensionality reduction
2- smoothing point
3- symmetric kernel
4- 1stD-transformation
5- full-cross validation algorithm

جدول ۱: توصیف آماری نمونه‌ها براساس تحلیل واریانس مقادیر شن

متغیر	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی	میانگین	میانه	مد	انحراف از معیار	دامنه	ضریب تغییرات %
شن	۱	۶۱	۰/۲۱۳	-۰/۷۴۵	۲۵/۲۶	۲۶	۳۰	۱۵/۰۷	۶۰	۵۹/۷

حضور هر دو نوع: آب کریستالی و آب هیدراته است (فرکانس‌های ارتعاشی گروه هیدروکسیل در مولکول آب)، و پدیده‌های طیفی حوالی ۲۰۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر، مربوط به خصوصیات کانی‌های رسی و مواد آلی نیز می‌باشد (Vašát et al., 2014). قابل ذکر است که افزایش مقادیر رس، سبب افزایش عمق پدیده‌های جذبی در باندهای ۱۴۰۰-۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ می‌شود (Summers et al., 2011).

طبق نظر استنبرگ و همکاران (۲۰۱۰)، خاک‌هایی که دارای مقادیر نسبتاً مشابه مواد آلی (SOM) بوده‌اند، پدیده جذب آن‌ها در دامنه مرئی، با افزایش مقدار رس، کاهش می‌یابد. درحالی که؛ خاک‌های شنی، بازتاب بیشتری نسبت به خاک‌های رسی نشان داده که به دلیل فراوانی ماکروپورها و بیشتر بودن فصل مشترک خاک- هوا^۱ بوده، که سبب پراکنش/بازتاب چندگانه^۲ می‌شود. همچنین این پدیده، می‌تواند متأثر از پایین‌تر بودن رطوبت و ماده آلی در خاک‌های شنی، باشد. شن در بین اجزای بافتی خاک، دارای آثار بسیار مهم و بارزی بر رفتارهای طیفی، پاسخ‌ها و امضاهای طیفی خاک در کل دامنه VNIR، می‌باشد (نگاره ۴) (دانش و همکاران، ۱۳۹۵; Sawut et al., 2014).



نگاره ۴: منحنی‌های بازتابش طیفی (SSRC) برخی از نمونه‌های خاک

1- air-soil interface

2- multiple reflection/scattering

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 (Dematté and Terra, 2014). که بر این اساس، دارای یک شکل افزایشی بازتاب تقریباً بین ۱۰۰۰ الی ۱۸۰۰ و کاهش در قسمت باقیمانده طیف مادون قرمز نزدیک می‌باشد (نگاره ۴).

با در نظر گرفتن پدیده‌های جذبی و رفتارهای طیفی که در منحنی‌های طیفی بازتابی رخ می‌دهند (UV-Vis-NIR-SWIR)، می‌توان اجزای شنی را مورد مطالعه قرار داد. دلیل آن، ارتعاشات ناشی از برهم‌کنش انرژی در مولکول‌های هیدروکسیل و آب (([OH] + [H\O\H]) می‌باشد، که در بین لایه‌های ساختاری مینرال‌ها یافت می‌شود (Ben-Dor et al., 2008a) و تحت اثر اندازه و اجزای بافت قرار می‌گیرد (پدیده‌های جذبی بارز در حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر (نگاره ۴)) (Casa et al., 2013; Sawut et al., 2014). پدیده جذبی بارز دیگر، به دلیل برهم‌کنش طیف تابشی با گروه آلومینیومی (Al-OH) مینرالوژیکی در ۲۲۰۰ نانومتر، آشکارسازی شده و تشخیص داده می‌شود (نگاره ۲-ب، ج؛ نگاره ۴) (Dematté and Terra, 2014).

به طور خلاصه، به دلیل وجود اجزاء و پارامترهای فعال طیفی مشابه در نمونه‌ها، حالت کلی منحنی‌های طیفی (SSRC)، بین نمونه‌ها مشابه بوده است. تمام طیف‌ها، دارای شکل بازتابی مشخصی بوده‌اند، درحالی که مقدار بازتاب در دامنه مرئی تا حدی کمتر و در مادون قرمز نزدیک بیشتر بوده است و با حضور باندهای جذبی مشخص در حول و حوش ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر همراه بوده است. بر طبق اظهارات (Bishop et al., 1994) پیک‌های جذبی حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر، مربوط به

جدول ۲- نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov test) در دو گروه واسنجی (calibration) و اعتبارسنجی (validation) مدل‌سازی شن

فرض نرمال بودن	p-value	حد بحرانی	آماره کولموگروف-اسمیرنوف	سطح معنی‌داری	تعداد نمونه	
تأیید	۰/۶۱۱	۰/۱۰۳	۰/۰۷۶۴	٪۱	۹۶	واسنجی شن
تأیید	۰/۹۵۷	۰/۱۷۵	۰/۰۸۷۹	٪۱	۳۲	اعتبارسنجی شن

می‌گیرد. این درحالی است، که آن یک نمونه کنار گذاشته شده، براساس باقی نمونه‌ها تخمین زده و اعتبارسنجی می‌شود. این گام کنار گذاشتن، به‌طور پیوسته برای تمامی نمونه‌ها انجام می‌شود تا اینکه هر نمونه برای یک‌بار خارج شده و براساس مدل تخمین‌گر، مجدداً برآورد و اعتبارسنجی شود (Lu et al., 2013).

براساس آنالیز متغیرهای وابسته (مقادیر شن نمونه‌ها)، متغیرهای مستقل (باندهای طیفی) (نگاره ۵- الف، ب، پ، ت، ث، ج، چ)، مقادیر حداقل مربعات خطا (RMSEcv) و نیز مقادیر حداکثر ضرایب تبیین در مجموعه کالیبراسیون (R²cv) (نگاره ۵- ث، ج، ژ، س، ش، ک، گ، ل، م)، مشخص شد که برای بررسی مقادیر شن منطقه مورد بررسی، مطلوب‌ترین تعداد فاکتورها، براساس دو و چهار مؤلفه پنهان اول بوده است (LV=2/LV=4). لذا، مشخص شد که بهترین و مطلوب‌ترین تعداد فاکتورهای پنهان، به‌عنوان اجزای مدل تخمین‌گر مقادیر شن در این منطقه، براساس ۲ و ۴ فاکتور بوده که بیشترین واریانس توصیفی (متغیرهای مستقل و وابسته) را در خود گنجانده است (نگاره ۵- الف، ب، پ، ت، ح، خ، ک، گ، ل، م).

بنابراین، براساس واریانس مقادیر باقیمانده مستقل و وابسته و نیز واریانس توصیفی متغیرهای طیفی و شن (نگاره ۵- الف، ب، پ، ت، ث، ج، چ)، بخش اعظم تغییرات طیفی و نیز تغییرات پارامتر شن مورد بررسی، توسط دو حالت مؤلفه (PC=2/PC=4)، قابل بررسی و مطالعه بوده است. به‌گونه‌ای که در نگاره ۵- الف، ب، پ، ت، مشاهده می‌شود، دو مؤلفه پنهان نخست، قادر به تمرکز ۵۸٪

۳-۳- عملیات واسنجی (کالیبراسیون) مدل تخمین‌گر شن قبل از آغاز مراحل کالیبراسیون، نمونه‌ها به‌طور تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند: ۲۵٪ نمونه‌ها برای انجام عملیات 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 ۲)، استیودنت تی-تست^۱ و لون-تست^۲ به‌ترتیب برای اثبات مشابه بودن توزیع نرمال در دو گروه، میانگین و واریانس، استفاده شد (McDowell et al., 2012)، که نتایج آن‌ها حاکی از شباهت کامل دو گروه در سطح معنی‌داری ٪۱ بوده‌اند.

به‌طور کلی، متغیرهای تخمین‌گر (مستقل (X)) دارای "چند-هم‌خطی و خود-همبستگی و چندهمبستگی"^۳ زیادی می‌باشند، لذا برای ایجاد مدل تخمین‌گر مناسب که فاقد بیش‌برازش و یا کم‌برازش باشد (به‌دلیل وجود چندهم‌خطی‌گری)، باید از مدل مناسب که دارای حداقل مربعات جزئی (RMSE) براساس تعداد مطلوب فاکتور پنهان (LVs) می‌باشد، بهره جست، که قسمت غالب تغییرات موجود در تخمین‌گرها و پاسخ‌ها را در خود جای داده باشد (Lu et al., 2013).

لذا برای دستیابی به تعداد فاکتورهای مطلوب مدل و نیز پرهیز از بیش‌تخمین، از روش اعتبارسنجی متقاطع با متد حذف تکی کامل (FLOOCV) استفاده شد. بر این اساس، تعداد n-1 نمونه برای عملیات واسنجی، مورد استفاده قرار

1- Student's T test
2- Levene's test
3- multi-collinearity/autocorrelation/multi-interconnection
4- overprediction

همچنین، تست نرمال بودن مقادیر باقیمانده^۶ براساس ۲ و ۴ مؤلفه اصلی و نیز مقایسه مقادیر باقیمانده نسبت به مقادیر تخمین شده^۷ حاکی از کیفیت خوب مدل تخمین گر شن در خاک‌های استان مازندران، دارد (نگاره ۵-ک، گ، ل، م). بنابراین، براساس آزمون IFt و نیز بررسی مقادیر واریانس باقیمانده نمونه‌ها در زیرمجموعه^۸ واسنجی (متغیرهای پاسخ و تخمین گر)، مشخص شد که غالب نمونه‌ها در رنج نرمال تأثیر قرار داشته‌اند (نگاره ۵-ح، خ، د، ذ، ر، ز، ن، و، ه، ی). نهایتاً، مدل تخمین گر مقادیر شن استان مازندران (مناطق نمونه برداری شده) براساس ۲ و ۴ مؤلفه اصلی، به ترتیب، با این مشخصات کالیبره شد: همبستگی دوطرفه پیرسون (RC) حدود ۰/۷۴۵ و ۰/۷۵۵، ضریب تبیین (R²C) (ضریب رگرسیون) 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 (نگاره ۶-الف، ب)، که به عنوان مطلوب‌ترین مدل‌های برآوردکننده مقادیر شن منطقه مورد بررسی (استان مازندران)، شناخته شدند (نگاره ۵-ژ، س، نگاره ۶-الف، ب).

مشخصات مدل برآوردکننده نهایی مقادیر شن استان مازندران (مناطق نمونه برداری شده) و نیز نتایج آماری فاکتورهای محاسبه شده مدل (عملیات اعتبارسنجی متقاطع)، در نگاره ۶، گردآوری شده است.

کیفیت و صحت مدل نهایی واسنجی شده تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران، با دو شاخص آماری تحلیل گر (به ویژه برای عملیات مدل سازی ابرطیفی پارمترهای خاک): RPD و RPIQD (Chang and Laird, 2002)، محاسبه و تعیین شدند. به این ترتیب: براساس LF=2: RPD_C حدود ۱/۵۱، RPIQ_C (Bellon-Maurel et al., 2010)، به میزان ۲/۴۴، براساس LF=4 نیز به این ترتیب بوده است: RPD_C حدود ۱/۵۴ و RPIQ_C به مقدار ۲/۴۸ بوده است.

واریانس مقادیر وابسته (شن) و ۹۵٪ واریانس مقادیر مستقل طیفی شده‌اند. همچنین، چهار 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 بیش برآزش مدل خواهد شد و از چند هم خطی گری و خودهمبستگی بین متغیرهای طیفی، نیز جلوگیری خواهد کرد. همچنین، براساس آزمون هتلینگ^۲، که براساس لوریج تعدیل شده^۳، استوار است (نگاره ۵-د، ذ، ل، م، ن، و، ه، ی) و نیز آزمون تأثیر (IFt) (نگاره ۵-ح، خ، ر، ز)، مشخص شد که بیش از ۹۰٪ نمونه‌های این مجموعه، دارای تأثیر بسیار بارز و قوی در فرآیند تخمین مقادیر شن و عملیات مدل سازی بوده‌اند که این امر حاکی از توزیع متوازن نمونه‌ها می باشد. براساس آزمون تأثیرپذیری (IFt) و نیز مقادیر باقیمانده واریانس حاصل از تست لوریج و آزمون هتلینگ، معلوم شد غالب مقادیر باقیمانده کمتر از حد لوریج و آماره هتلینگ^۴ بوده است که حاکی از عدم حضور داده‌های نامتجانس است (نگاره ۵-ح، خ، د، ذ، ن، و، ه، ی).

شایان ذکر است که فاکتور لوریج (Lev)، در واقع منعکس کننده فاصله هر طیف (X) از مرکز (میانگین طیفی) (Xc)، در هر مدل می باشد. سپس بر مبنای ضرایب بتا (B-coef)، آنالیز وزنی و نیز با استفاده از تست عدم قطعیت مارتن^۵، طول موج‌های مؤثر و معنی دار، تعیین و محاسبه شد (نگاره ۵-ص، ض، ط، ظ، ع، غ، ف، ق). به این ترتیب مؤثرترین دامنه‌های طیفی در برآورد اجزای شنی بافت، نیز مشخص شدند (نگاره ۵-ص، ض، ط، ظ، ع). که بر این اساس: بازه‌های بازتابی ماوراءبنفش، مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه (UV-Vis-NIR-SWIR)، در بررسی اجزای شنی خاک‌های استان مازندران، نقش مهمی ایفا کرده‌اند (نگاره ۵-ط، غ، ف، ق).

1- spectral distinction

2- Hotelling T² stat

3- adjusted leverage

4- Hotelling T²

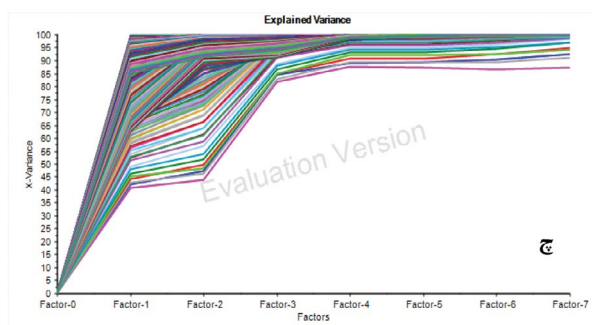
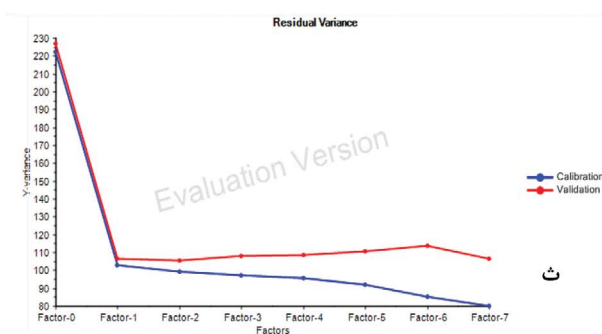
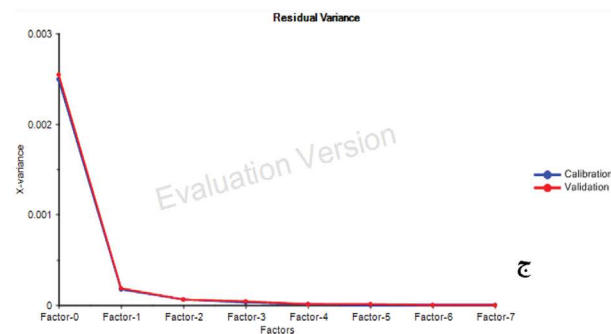
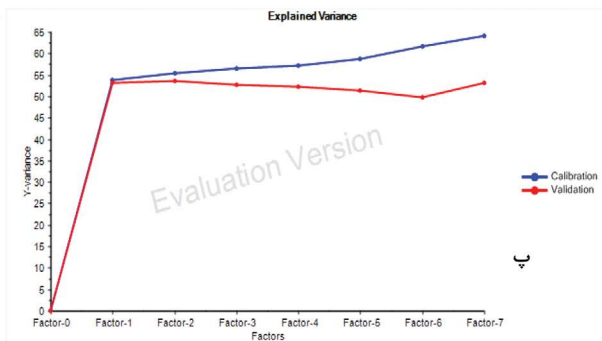
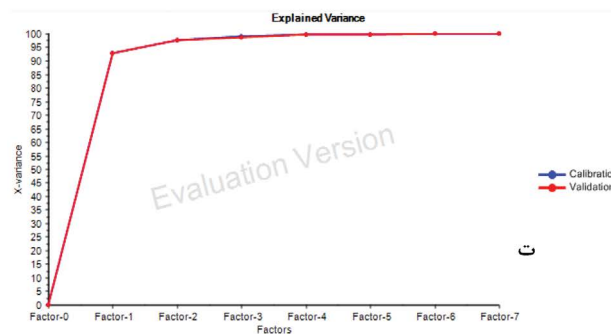
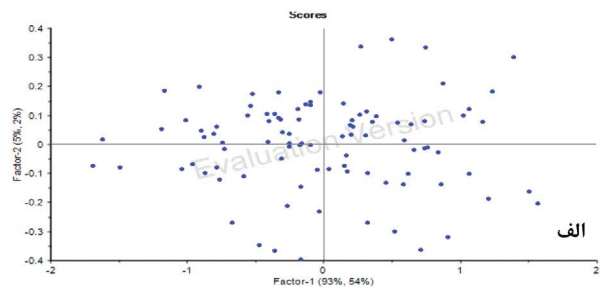
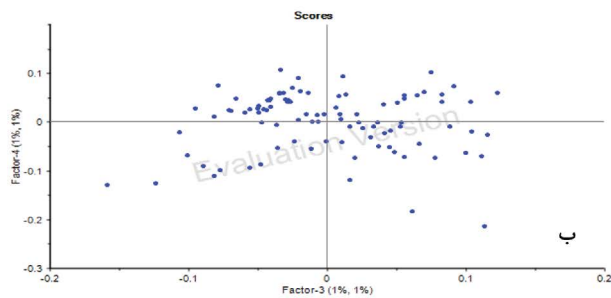
5- Martens' uncertainty test

6- normal probability of residuals

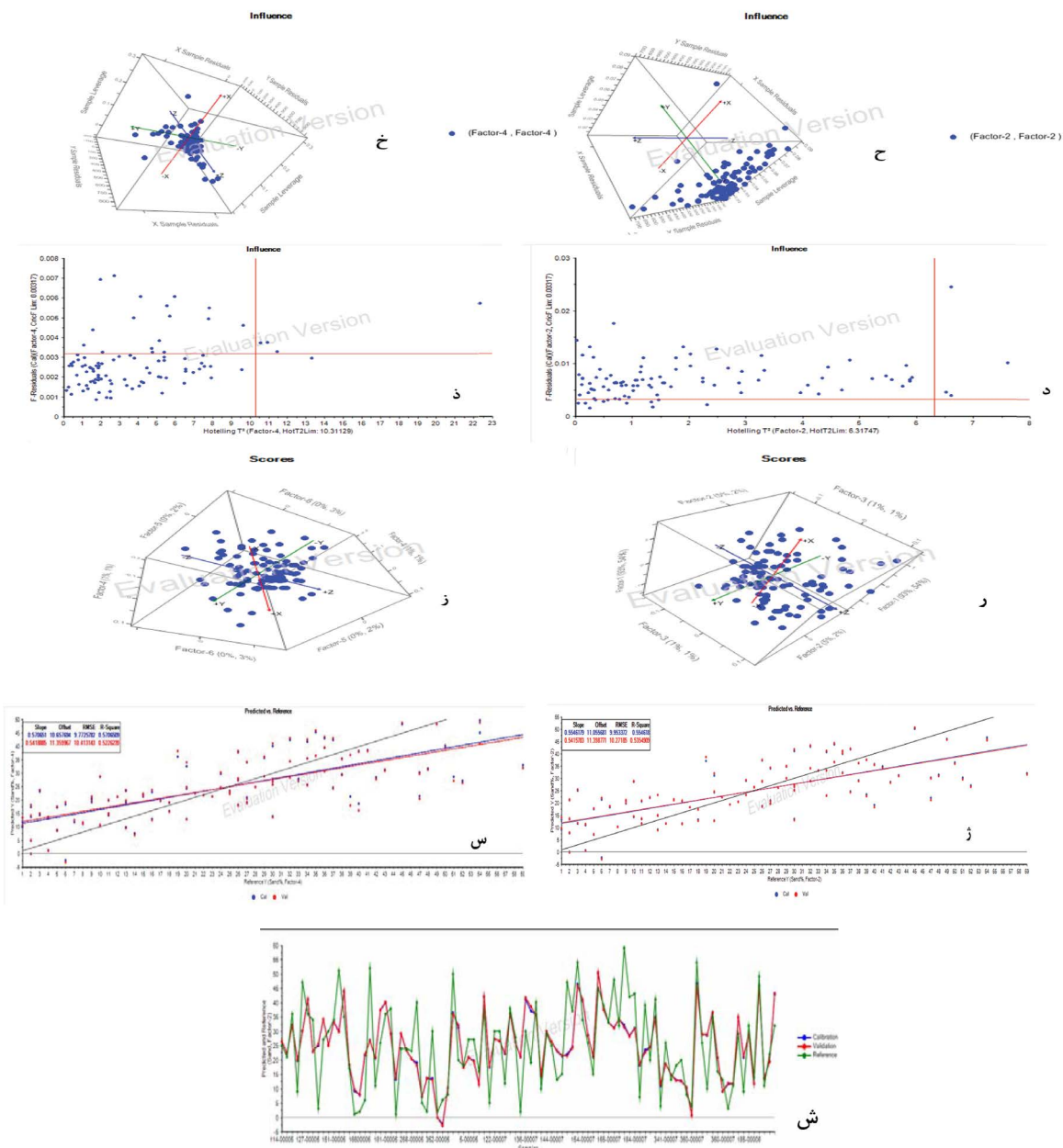
7- y-residual vs y-predicted

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران با استفاده از فناوری ... / ۷۵

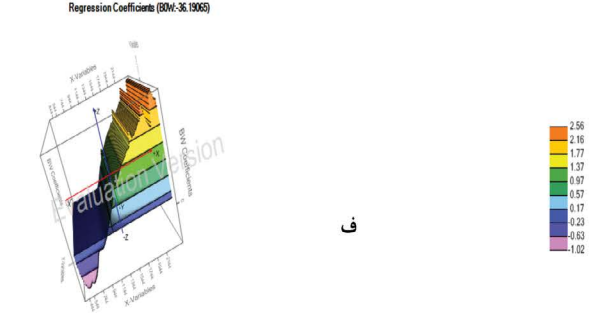
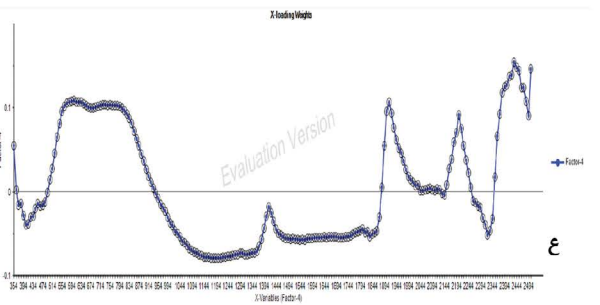
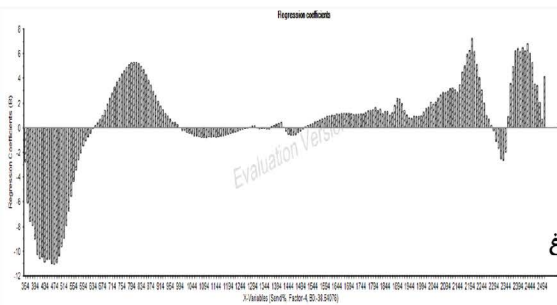
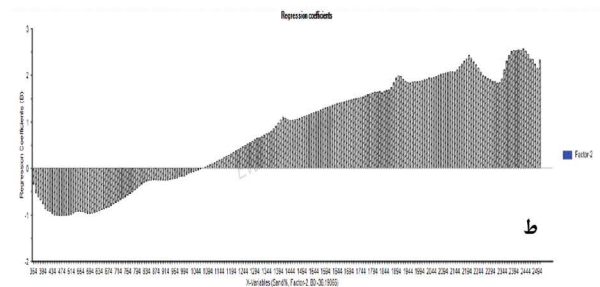
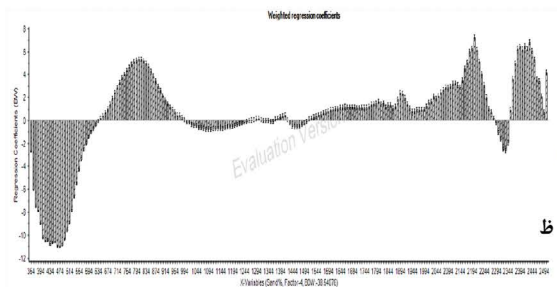
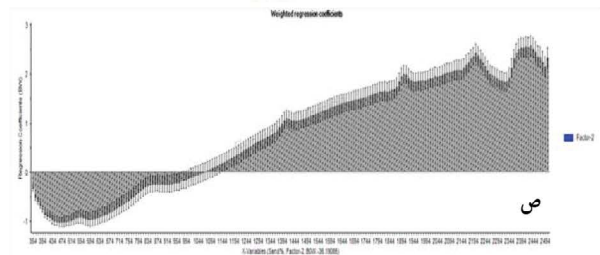
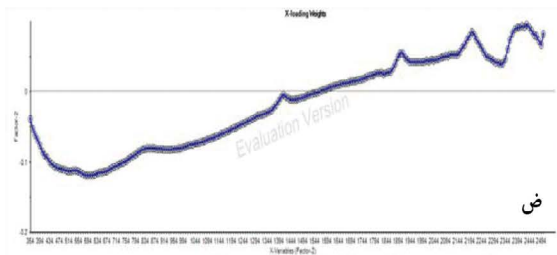


نگاره ۵: خروجی مدل: {عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی (پنهان) pls: الف} تراکم (لحظه‌ای) واریانس طیفی و مقادیر شن در فاکتورهای اول و دوم؛ ب) تراکم واریانس طیفی و مقادیر شن در فاکتورهای سوم و چهارم؛ پ) واریانس توصیفی (cumulative descriptive variance) مقادیر شن براساس ۷ مؤلفه منتخب؛ ت) واریانس توصیفی (میانگین) تجمعی مقادیر طیفی براساس ۷ فاکتور؛ ث) واریانس مقادیر باقیمانده در متغیر وابسته (شن) براساس فاکتورهای منتخب؛ ج) واریانس مقادیر باقیمانده در متغیرهای مستقل (باند‌های بازتابی) براساس فاکتورهای منتخب؛ چ) واریانس توصیفی طیفی کل (به تفکیک تعداد متغیرهای مستقل spectral variables)؛

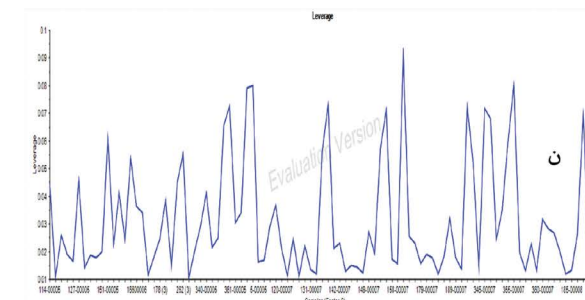
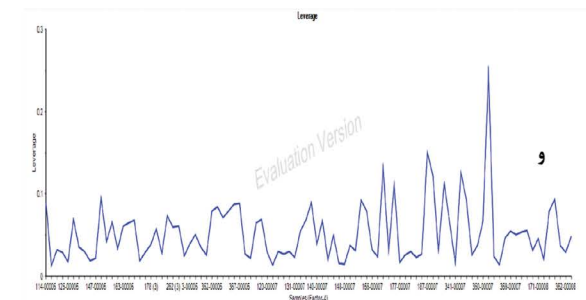
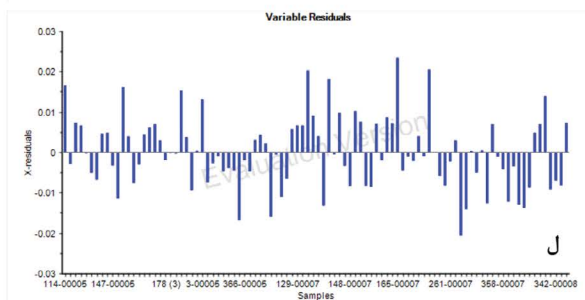
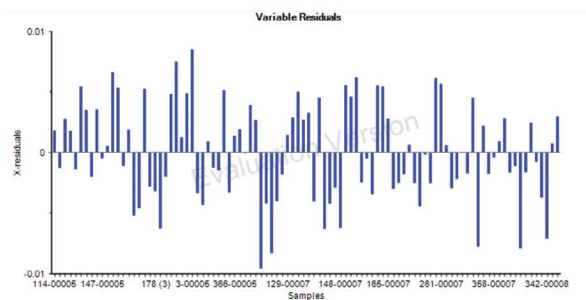
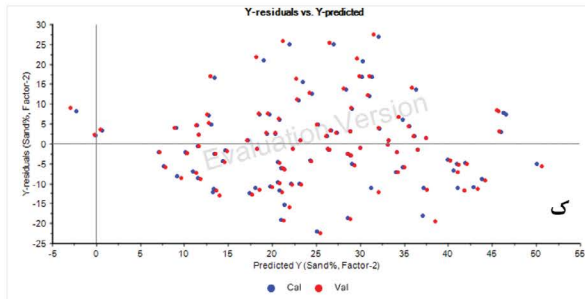
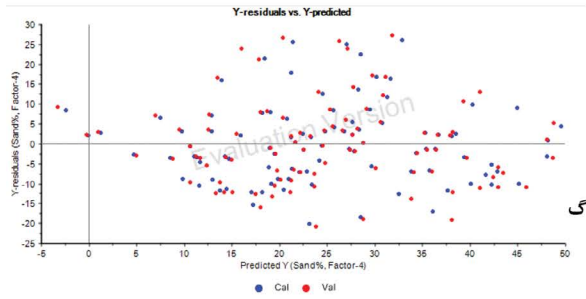


ادامه نگاره ۵: ح) نمودار تأثیر (نفوذ) براساس رابطه بین واریانس متغیرهای وابسته، مستقل و مقادیر لوریج تعدیل شده نمونه‌ها (sample adjusted leverage) براساس مدل ۲ مؤلفه‌ای؛ خ) نمودار تأثیر (نفوذ) براساس رابطه بین واریانس متغیرهای وابسته، مستقل و مقادیر لوریج تعدیل شده نمونه‌ها براساس مدل ۴ مؤلفه‌ای؛ د) آزمون تأثیر بر مبنای نسبت بین آماره هتلینگ و باقیمانده‌ها (Hotelling T2 vs F-residuals) بر مبنای ۲ مؤلفه اصلی؛ ذ) آزمون تأثیر بر مبنای نسبت بین آماره هتلینگ و باقیمانده‌ها بر مبنای ۴ مؤلفه اصلی؛ {عملیات امتیازبندی (scoring process) بر مبنای متمرکزسازی (واریانس) اطلاعات: ر) فاکتور اول، دوم و سوم؛ ز) فاکتور چهارم، پنجم و ششم؛ ؛ نمودار مدل نهایی واسنجی شده تخمین‌گر شن براساس: ژ) نسبت مقادیر تخمینی در ست (subset) واسنجی نسبت به مقادیر مرجع (reference) (عملیات اعتبارسنجی متقاطع بروش حذف تکی (LOOCV)) براساس ۲ مؤلفه اصلی؛ س) نسبت مقادیر تخمینی درست واسنجی نسبت به مقادیر مرجع (عملیات اعتبارسنجی متقاطع بروش حذف تکی (LOOCV)) براساس ۴ مؤلفه اصلی؛ ش) مقایسه مقادیر مرجع و تخمینی در نمونه‌های ست واسنجی؛ {مشخص‌سازی محدوده‌های طیفی (spectral range) (متغیرهای مستقل) مهم در واسنجی مدل تخمین‌گر شن براساس ۲ فاکتور پنهان؛

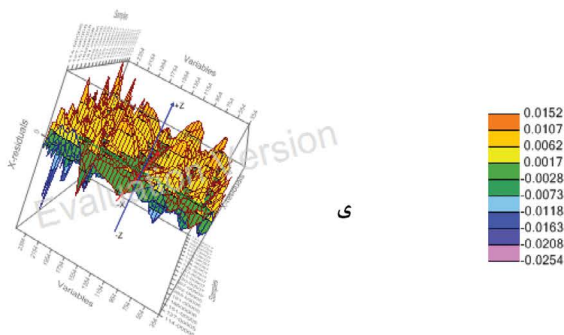
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سج) / ... / ۷۷
 تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران با استفاده از فناوری ...



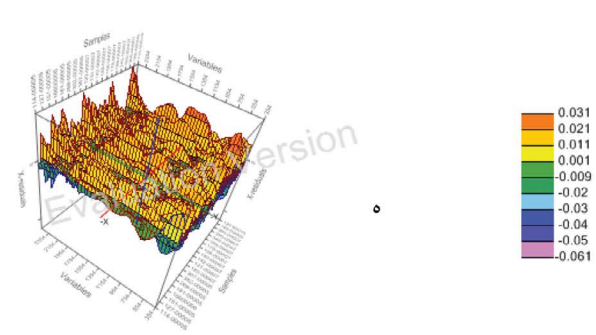
ادامه نگاره ۵: ص) ضرایب وزنی رگرسیونی (B_w)؛ ض) وزن بارهای طیفی (spectral loading weights) نسبت به ۲ مؤلفه اول مدل سازی؛ ط) ضرایب رگرسیونی ساده (B_0)؛ براساس ۴ فاکتور پنهان: ظ) ضرایب وزنی رگرسیونی (B_w)؛ ع) وزن بارهای طیفی نسبت به ۴ مؤلفه اول مدل سازی؛ غ) ضرایب رگرسیونی ساده (B_0)؛ ف) نمودار ماتریسی (matrix plot) روابط بین متغیرهای مستقل، وابسته و ضرایب رگرسیونی (در تعیین باندهای طیفی مؤثر در پروسه تخمین مقادیر شن) بر مبنای ۲ فاکتور؛ ق) نمودار ماتریس روابط بین متغیرهای مستقل، وابسته و ضرایب رگرسیونی (در تعیین باندهای طیفی مؤثر در پروسه تخمین مقادیر شن) بر مبنای ۴ فاکتور؛



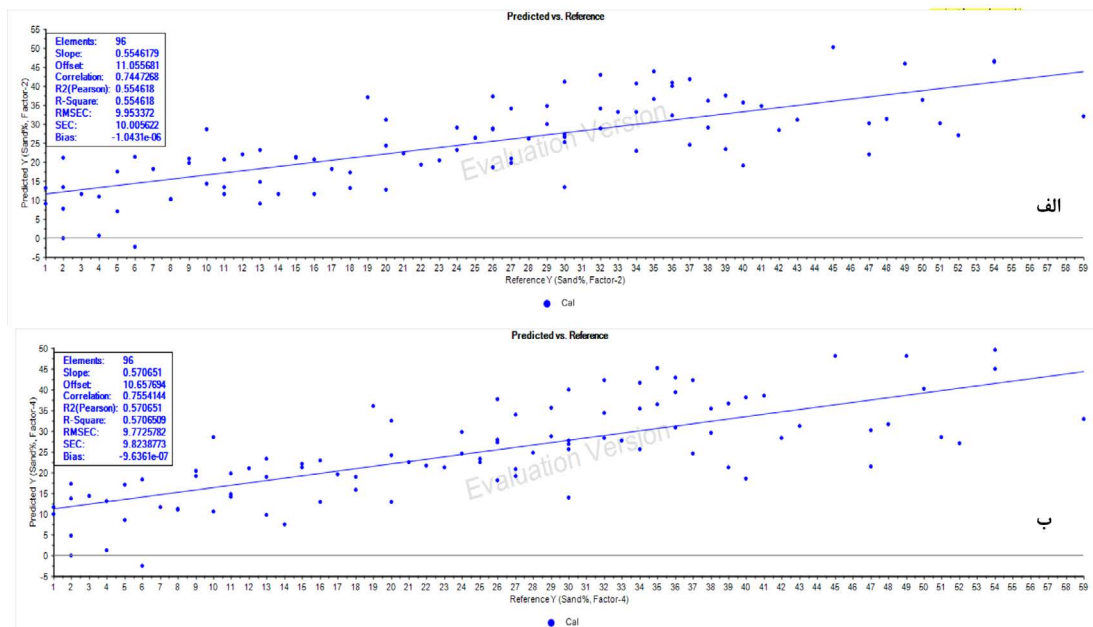
Sample and Variable X-residuals



Sample and Variable X-residuals



ادامه نگاره ۵: ک/گ) نسبت مقادیر تخمینی به مقادیر باقیمانده متغیرهای وابسته (شن) بر اساس ۲ و ۴ فاکتور پنهان؛
 ل/م) بقایای متغیرهای مستقل (predictor variable residuals) بر اساس نمونه‌ها در دو حالت ۲ و ۴ مؤلفه‌ای؛ ن/و) نمودار
 بررسی مقادیر لوریج تعدیل شده بر مبنای نمونه‌ها در دو حالت ۲ و ۴ مؤلفه‌ای؛ ه/ی) نمودار ماتریسی روابط بین نمونه‌ها با
 بقایای متغیرهای طیفی (تخمین گر) در دو حالت ۲ و ۴ مؤلفه‌ای



نگاره ۶: خروجی مدل: مدل تخمین گر نهایی شن بر اساس ست واسنجی: الف) مقادیر تخمینی و مرجع پارامتر شن، بر اساس مدل دارای ۲ بردار پنهان؛ ب) مقادیر تخمینی و مرجع پارامتر شن، بر اساس مدل تخمینی حاوی ۴ بردار پنهان

و محاسبه شد (نگاره ۷-ج، د). نتایج حاصل از عملیات اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) بر اساس $LF=2$ ، به این ترتیب بوده است: مقدار ضریب همبستگی (بین مقادیر تخمینی و مقادیر آزمایشگاهی مرجع در داده‌های اعتبارسنجی مستقل: R_p) به مقدار $0/83$ ، ضریب رگرسیونی (ضریب تبیین: R_p^2) حدود $0/68$ ، میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی ($RMSEP_p$) $8/68$ ، خطای استاندارد اعتبارسنجی (SE_p) حدود $8/72$ و مقدار انحراف تقریبی (bias) $1/26$ - (نگاره ۷ و جدول ۳). این مقادیر بر اساس $LF=4$ به این ترتیب بوده است: همبستگی دوطرفه پیرسون حدود $0/82$ ، ضریب تبیین تقریبی $0/67$ ، $RMSEP_p$ حدود $8/83$ و SE_p حدود $8/92$ و نیز انحراف $0/93$ - (نگاره ۷ و جدول ۳). به همین ترتیب، مقادیر لوریج بر اساس تست لوریج تعدیل‌شده^۱، برای مؤلفه‌های دوم و چهارم به ترتیب نگاره ۸، محاسبه شد. پارامترهای صحت و قدرت مدل، بر اساس نمونه-های اعتبارسنجی مستقل، به این ترتیب بوده است: $LV=2$ ،

مقادیر RPD_p و $RPIQ_p$ به ترتیب: $1/78$ و $2/45$ و نیز همین پارامترهای کیفیت مدل برای $LV=4$ به ترتیب: $1/75$ و $2/41$

6- adjusted leverage

۴-۳- عملیات اعتبارسنجی مدل واسنجی شده شن صحت‌سنجی و ارزیابی کیفیت مدل تخمین گر، که در قسمت کالیبراسیون به دست آمد، با استفاده از ۳۲ نمونه مستقل اعتبارسنجی^۱ انجام شد (Lu et al., 2013). بر اساس مدل PLS به دست آمده از زیرمجموعه کالیبراسیون^۲ که بر اساس ۲ و ۴ فاکتور بوده است (نگاره‌های ۵ و ۶)؛ مقادیر شن منطقه بر اساس داده‌های طیفی ۳۲ نمونه مستقل، سنجیده شده و سپس با مقادیر مرجع آن که در آزمایشگاه تعیین شده بودند، مقایسه شد. در نهایت، مقادیر شن نمونه‌های مستقل مجموعه اعتبارسنجی^۳، با دقت خوبی برآورد شدند. نگاره ۷، بیانگر مقادیر تخمین‌زده شده در مقایسه با مقادیر مرجع در زیرمجموعه اعتبارسنجی مستقل^۴ می‌باشد، که بر اساس $LV=4$ و $LV=2$ محاسبه شده است (نگاره ۷-الف، ب). همچنین نمودارهای مقادیر تخمین‌شده در دامنه مقادیر انحراف معیار^۵ آن‌ها، نیز بر اساس ۲ و ۴ مؤلفه پنهان، ترسیم

1- separate standalone subset

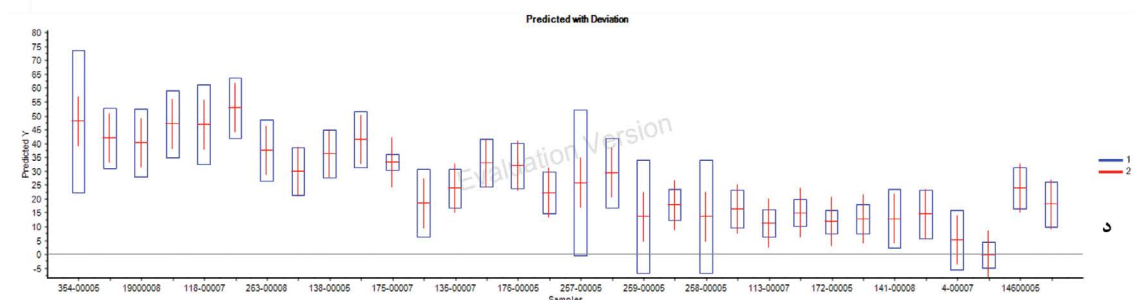
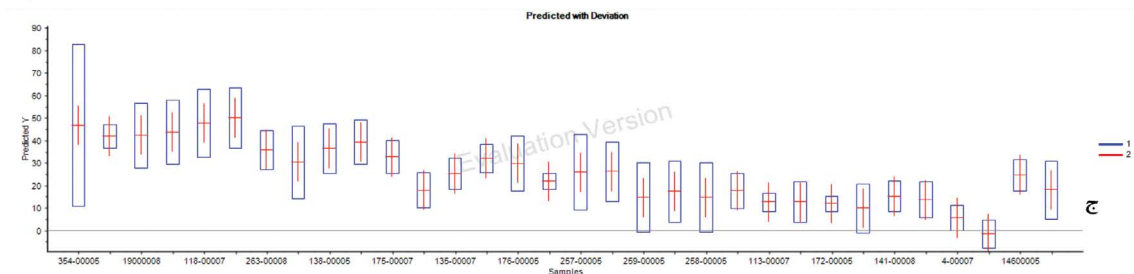
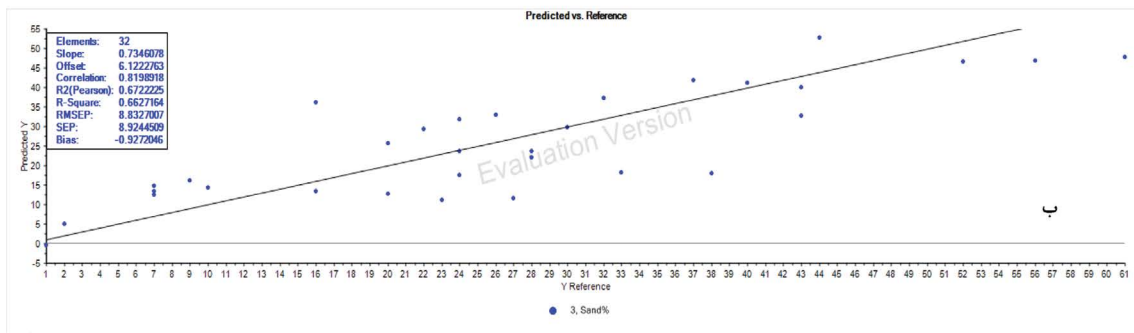
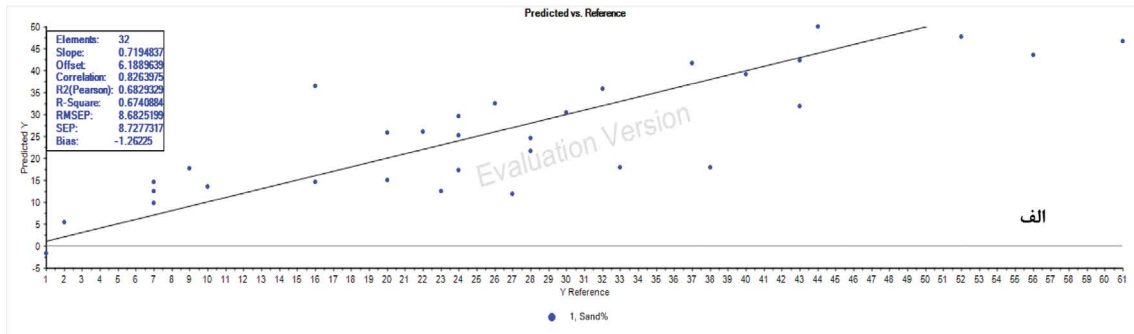
2- cal.subset

3- val.subset

4- independent standalone validation subset

5- standard deviation range

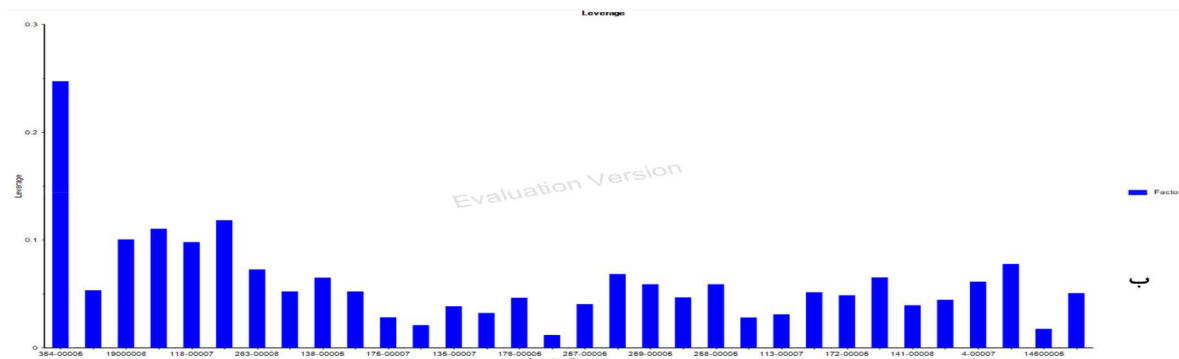
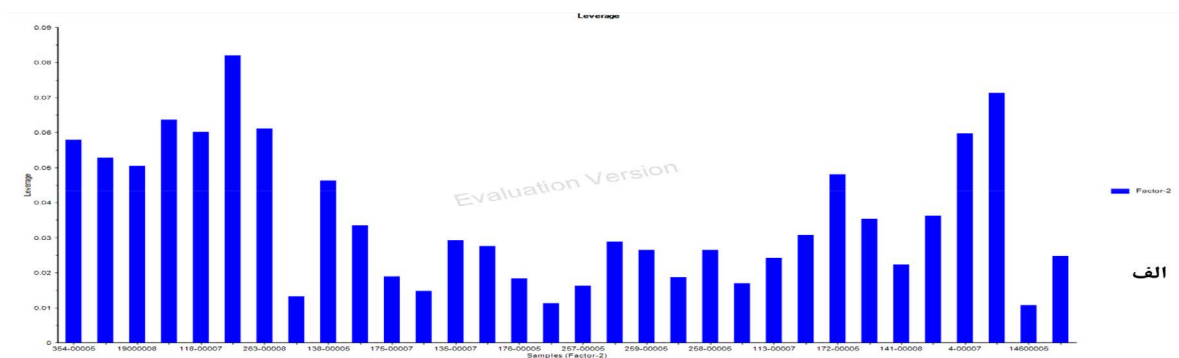
محاسبه شده است (نگاره ۷ و جدول ۳). براساس طبقه‌بندی کلی کیفیت مدل، در صورتی که مقدار RPD و RPIQ، بیش از ۲ باشد، برآورد بسیار دقیق است، اگر بین ۲- ۱/۴ باشد، بیانگر عدم توانایی مدل می‌باشد (Chang and Laird, 2002).



نگاره ۷: الف/ب) نمودار مقادیر تخمین زده شده (predicted) در مقایسه با مقادیر مرجع (reference) توسط مدل نهایی تخمین‌گر شن، در زیر-مجموعه نمونه‌های مستقل مجزا (separate standalone subset)، بر اساس ۲ فاکتور پنهان/۴ فاکتور پنهان؛ ج/د) نمودار مقادیر تخمینی شن به‌مراه انحراف معیار (خطا) (deviation) در نمونه‌های مستقل مجزا ست (set) اعتبارسنجی، بر اساس ۲ فاکتور اصلی/۴ فاکتور اصلی

جدول ۳- پارامترهای آماری عملیات واسنجی شن منطقه با استفاده از نمونه‌های مستقل، براساس مدل تخمین‌گر

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	1	8.9425	8.9656	-1.4482	0.6939	6.6836	0.8153	8.9485	0.9579	2.5061
Factor-2	2	8.6825	8.7277	-1.2623	0.7195	6.1890	0.8264	8.7009	0.9492	2.5475
Factor-3	3	8.6520	8.7785	-0.4496	0.7510	6.1646	0.8269	8.6884	0.9106	2.7844
Factor-4	4	8.8327	8.9245	-0.9272	0.7346	6.1223	0.8199	8.8467	0.9151	3.1042



نگاره ۸: مقادیر لوریج حسابی (calculative/adjusted leverage) براساس نمونه‌های زیرمجموعه اعتبارسنجی مستقل در عملیات صحت‌سنجی مدل برآورد شن، براساس: الف) دو مؤلفه پنهان؛ ب) چهار مؤلفه پنهان

(DAFs) در حدود ۱۴۰۰ (CR1400) و ۱۹۰۰ (CR1900)

نانومتر، به‌طور کلی به حضور آب کریستالی و هیدراته، مربوط می‌شود. به‌علاوه، از آنجایی که CR1400 به ارتعاشات گروه OH- سیلیکات‌ها مربوط می‌شود، لذا براساس اینگونه پدیده‌های جذبی، به‌طور غیرمستقیم می‌توان به بررسی اجزای شن، پرداخت (Curcio et al., 2013). همچنین، براساس بررسی‌های (Viscarrá Rossel et al., 2006) و نیز دانش و همکاران، ۱۳۹۵؛ 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

۴- بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق فعلی، که بر مبنای سنجش مجاورتی و عملیات تحلیل طیفی-آماری PLSR استوار بوده، به‌دلیل بهره بردن این تکنیک از کل علائم طیفی و نه فقط یک یا چند پدیده طیفی خاص (همچون روش حذف پیوستار CR)، و نیز به این دلیل که PLSR از همبستگی‌های بین بافت و دیگر پارامترهای خاک، برای مرتبط کردن با طیف‌های بازتابی به‌دست آمده، بهره می‌برد، سبب تقویت هرچه بیشتر مدل‌های تخمین‌گر شده است (Curcio et al., 2013). همانطوری که در برخی تحقیقات ذکر شده، پدیده‌های جذبی غالب

از ۶۰٪ واریانس اطلاعات متغیرهای شن و بیش از ۹۸٪ واریانس اطلاعاتی متغیرهای طیفی را در خود متمرکز نمایند (نگاره ۵- الف، ب، پ، ت، ث، ج، چ). بهترین مدل واسنجی شده تخمین شن با این مشخصات حاصل شد: $R_c: 0.76$; $R^2_c: 0.57$; $RMSE_c: 9.77$; $SE_c: 9.82$ (نگاره‌های ۵ و ۶).

ضرایب همبستگی مقادیر شن با دامنه‌های طیفی مؤثر نیز، به این ترتیب محاسبه شدند: UV: باند ۳۹۰: ۰/۴۶، Vis: باندهای ۵۱۰ الی ۵۴۰ در حدود ۰/۵۳، ۶۸۰ الی ۶۹۰ در حدود ۰/۵۵، NIR: ۹۵۰ الی ۹۷۰ در حدود ۰/۶۷ و نیز باند طیفی ۱۱۰۰ در حدود ۰/۷۰، SWIR: ۱۴۱۰ به میزان ۰/۷۶، ۱۸۶۰ الی ۱۹۰۰ در حدود ۰/۷۶، ۲۱۸۰ الی ۲۲۲۰ در حدود ۰/۷۷، که باندهای بازتابی تعیین شده (دامنه‌های بازتابی) (نگاره ۵- ص، ض، ط، ظ، ع، غ، ف، ق)؛ با بیشترین مقادیر همبستگی ($R(CCmax)$)، حاکی از نفوذ و تأثیر بالای آن‌ها به عنوان متغیرهای مستقل تخمین گر، در فرآیند مدل‌سازی پارامتر شن در منطقه مورد بررسی در استان مازندران، بوده‌اند. لذا، محدوده‌های طیفی مؤثر در فرآیند مدل‌سازی شن نیز به این صورت تعیین شدند: محدوده بازتابی فرابنفش: ۳۹۰: مرئی: ۴۴۰ الی ۵۴۰؛ مادون قرمز نزدیک: ۷۴۰ الی ۹۹۰؛ مادون قرمز موج کوتاه: ۱۴۳۰ الی ۱۸۹۰، ۱۹۳۰، ۲۱۹۰، ۲۲۴۰، ۲۳۳۰ الی ۲۴۴۰ نانومتر، که این نتایج تا حد زیادی منطبق بر نتایج به دست آمده توسط (Casa et al., 2013) بر مبنای سنجنده‌های ابرطیفی هوایی MIVIS و نیز داده‌های ابرطیفی ماهواره‌ای CHRIS-PROBA، بوده است. همچنین، براساس آزمون‌های هتلینگ، لوریج تعدیلی و واریانس باقیمانده، نیز کیفیت مدل واسنجی شده شن، تأیید شد (نگاره‌های ۵ و ۶). اعتبارسنجی مدل شن منطقه مورد بررسی، براساس ۳۲ نمونه مستقل در زیرمجموعه اعتبارسنجی انجام شد. که بر مبنای مدل ۴ فاکتوری مشخصات عملیات اعتبارسنجی به این ترتیب بوده است: $R_p: 0.82$; $R^2_p: 0.67$; $RMSE_p: 8.83$; $SE_p: 8.92$ و انحراف ۰/۹۳. - همچنین براساس مدل ۲ برداری، عملیات

و نیز گروه‌های هیدروکسیل و آب موجود در شبکه کانی‌ها، در ۲۲۰۰ نانومتر، رخ می‌دهند (دانش و همکاران، ۱۳۹۵ Viscarra Rossel et al., 2006)، که در تحقیق حاضر نیز مشهود بوده است (نگاره‌های ۲ و ۴). البته، تخمین اجزای شن معمولاً، به دلیل همپوشانی برخی از پدیده‌های جذبی و اختلالات طیفی^۲، که سبب اختلال در پدیده‌های دخیل در فرآیند تخمین اجزای بافت، همچون دامنه بازتابی VNIR/SWIR می‌شود، با کاهش قدرت مدل همراه است، که برخی از این عوامل همچون، حضور پیوندها و گروه‌های OH-Al و OH-Fe می‌باشند، که بر مدل تخمین گر اجزای بافت (مقادیر شن)، تأثیرگذار است (Viscarra Rossel et al., 2006; Viscarra Rossel et al., 2009)

تحقیقات انجام شده، تأییدکننده آن است که دامنه‌های بازتابی مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه، بالخص طول‌موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر، در تخمین اجزای بافت خاک، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند، که نتایج تحقیق حاضر نیز بر آن، صحنه می‌گذارد. همچنین، پیک‌های جذبی بارز در محدوده مرئی (۴۶۰، ۵۴۰ و ۶۵۰ نانومتر)، برای تخمین مقادیر شن، نقش مهمی ایفا می‌کنند. این درحالی است که پیک‌های تداخلی و مزاحم^۳ نیز در باندهای زیر ۴۵۰ و باندهای بیش از ۶۷۰ نیز رخ داده و باید به آن‌ها توجه کرد (Viscarra Rossel et al., 2006).

طی تحقیق حاضر، براساس مدل تخمین گر مقادیر شن، در زیرمجموعه داده‌های کالیبراسیون شامل ۹۶ نمونه، و نیز زیرمجموعه اعتبارسنجی براساس ۳۲ نمونه مستقل مجزا، مشخص شد که از بین حداکثر ۷ متغیر پنهان، دو و چهار مؤلفه اول می‌توانند بهترین تخمین را در خاک‌های منطقه ارائه دهند. بنابراین، فرآیند واسنجی مدل شن بر مبنای ۴ فاکتور نخست، و روش اعتبارسنجی متقاطع کامل با متد حذف تکی (FLOOCV)، انجام شد. زیرا براساس نگاره ۵، این ۴ فاکتور نخست قادرند بیش

1- lattice minerals

2- spectral distortion/perturbation

3- interfering peaks

۵- منابع و مأخذ

- ۱- دانش، م.، بهرامی، ح.ع.، درویش‌زاده، ر.، نوروزی، ع.ا.، ۱۳۹۵. بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف‌سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS). سنجش از دور و جی آی اس ایران: ۸ (۱): ۷۱-۹۴.
- 2- Abdu, H., Robinson, D., Seyfried, M., Jones, S.B., 2008. Geophysical imaging of water-shed subsurface patterns and prediction of soil texture and water holding capacity. *Water Resour. Res.*, 44.
- 3- Aichi, H., Fouad, Y., Walter, C., Viscarra Rosset, R.A., Chabaane, Zohra Lili, Sanaa, Mustapha, 2009. Regional predictions of soil organic carbon content from spectral reflectance measurements. *Biosyst. Eng.* 104, 442-446.
- 4- Andrade, F., Mendonça, E., Silva, I., 2013. Organic acids and diffusive flux of organic and inorganic phosphorus in sandy-loam and clayey latosols. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44, 1211-1223.
- 5- Annea, N.J.P., Abd-Elrahmana, A.H., Lewis, D.B., Hewitt, N.A., 2014. Modeling soil parameters using hyperspectral image reflectance in subtropical coastal wetlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33 (2014) 47-56.
- 6- Barnes, E.M., Baker, M.G., 2000. Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. *Applied Engineering in Agriculture* 16, 731-741.
- 7- 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): 1073-1081.
- 8- Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.* 75: 173-243.
- 9- 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: 1113-1123.
- 10- Bengtsson, S., Berglund, T., Kylin, H., 2007. Near infrared reflectance spectroscopy as a tool to predict pesticide sorption in soil. *B. Environ. Contam. Tox.* 78: 295-298.
- 11- Bishop, J.L., Pieters, C.M., Edwards, J.O., 1994,

اعتبارسنجی مستقل شن با این مشخصات انجام شد: R_p : ۰/۸۳، R^2_p : ۰/۶۸، $RMSE_p$: ۸/۶۸، SE_p : ۸/۷۲ و انحراف ۱/۲۶- (نگاره ۷، جدول ۳).

براساس پارامترهای سنجش کیفیت و قدرت مدل در دو زیرمجموعه (واسنجی (C) و اعتبارسنجی (P)) در تخمین مجزای پارامتر شن خاک، مدل تخمین‌گر شن براساس ۲ فاکتور: $RPD_c=1/51$ ، $RPIQ_c=2/44$ ، $RPD_p=1/78$ ، $RPIQ_p=2/45$ و براساس ۴ فاکتور: $RPD_c=1/54$ ، $RPIQ_c=2/48$ ، $RPD_p=1/75$ ، $RPIQ_p=2/41$ از کیفیت و قدرت مناسبی برای تخمین، برخوردار می‌باشد. لذا، براساس مقادیر RPIQ که بالای ۲ بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌ها، قادر به تخمین بسیار خوبی از اجزای شن در استان مازندران بوده‌اند. این امر نشان از کیفیت مناسب مدل‌های برآورد کننده براساس داده‌های مجاورت‌سنجی دارد.

با توجه به این مهم که امروزه، نسل جدیدی از دورسنجنده‌های ابرطیفی با قدرت تفکیک طیفی بالا، عملیات سنجش را انجام می‌دهند، نتایج پژوهش حاضر، می‌تواند نقطه آغازی برای پهنه‌بندی دقیق اجزای شن بافت خاک، با استفاده از سکوه‌های دورسنجی باشد. البته، تحقیقات بیشتری باید بر روی کاربرد طیف‌سنجی در تخمین اجزای بافت بر مبنای مجاورت‌سنجی و دورسنجی، انجام پذیرد. همچنین، استفاده از این فناوری، امکان تعیین و آشکارسازی طول‌موج‌های کلیدی^۱ در تخمین اجزای شن بافت را فراهم می‌کند. لذا از طول‌موج‌های کلیدی مؤثر در برآورد این اجزاء (اجزای شنی بافت منطقه)، می‌توان برای عملیات بیش‌مقیاس‌سازی و نیز ساخت سنجنده‌های ابرطیفی هوابرد یا ماهواره‌ای، در آینده، بهره برد تا امکان پهنه‌بندی دقیق اجزای بافت خاک را از سکوه‌های هوایی و فضایی در مقیاس‌های بسیار وسیع، بتوان فراهم نمود.

- 22- 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 (2011) 894–906.
- 23- Demattê, J.A.M., Garcia, G.J., 1999. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63 (2), 327–342.
- 24- Demattê, J.A.M., Terra, F.S., 2014. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations, *Geoderma* 217–218(2014): 190–200.
- 25- Eisele, A., Lau, I., Hewson, R., Carter, D., Wheaton, B., Ong, C., Cudahy, T.J., Chabrilat, S., Kaufmann, H., 2012. Applicability of the thermal infrared spectral region for the prediction of soil properties across semi-arid agricultural landscapes. *Remote Sens.* 4, 3265–3286.
- 26- 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 (2014) 57–63.
- 27- Geladi, P., Kowalski, B.R., 1986. Partial least-squares regression: a tutorial. *Analytica Chimica Acta* 185, 1–17.
- 28- Goldshleger, N., Ben-Dor, E., Lugassi, R., Eshel, G., 2010. Soil degradation monitoring by remote sensing: examples with three degradation processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1433–1445.
- 29- Gomez, C., Lagacherie, P., 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.
- 30- 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 (2013) 86–97.
- 31- Goncalves, J., Carlyle, J., 1994. Modelling the influence of moisture and temperature on net nitrogen mineralization in a forested sandy soil. *Soil Biol. Biochem.* 26, 1557–1564.
- Infrared spectroscopic analyses on the nature of water in montmorillonite. *Clay, Clay Miner.* 42: 702–716.
- 12- 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.
- 13- Brown, D.J., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Dewayne Mays, M., Reinsch, T.G., 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, 273–290.
- 14- 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 Agrônômico (IAC), Campinas.
- 15- Carroll, D., 1958. Role of clay minerals in the transportation of iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 14, 1–16.
- 16- 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, 17–26.
- 17- Chabrilat, S., Ben-Dor, E., Rossel, R.A.V., Demattê, J.A.M., 2013. Quantitative soil spectroscopy. *Appl. Environ. Soil Sci.* 3, 1–3.
- 18- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, Jr. C.R., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy—principal components regression analyses of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 480–490.
- 19- Chang, C.W., Laird, D.A., 2002. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N, *Soil Science*, 167: 110–116.
- 20- 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 (2013) 44–58.
- 21- Curcio, D., Ciralo, G., D’Asaro, F., Minacapilli, M., 2013. Prediction of soil texture distributions using VNIR–SWIR reflectance spectroscopy. *Procedia Environmental Sciences* 19 (2013) 494–503.

- hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment* 112, 825–835.
- 42- 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 Sens. Environ.* 125, 34–48.
- 43- Li, M. Z. (ed.) 2006. *Spectral Analysis Technology and Application* (in Chinese). Science Press, Beijing.
- 44- Liang, S., 1997. An investigation of remotely sensed soil depth in the optical region. *International Journal of Remote Sensing*, 18(16): 3395–3408.
- 45- 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(2013): 26–33.
- 46- Madari, B.E., Reeves III, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E., McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma*. 136: 245–259.
- 47- 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(2012): 312–320.
- 48- Miller, D.T.G.A.R.W., 2004. *Soils in Our Environment: Upper Saddle River*, 10th ed. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- 49- Minasny, B., McBratney, A.B., Tranter, G., Murphy, B.W., 2008. Using soil knowledge for the evaluation of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for predicting soil physical and mechanical properties. *Eur. J. Soil Sci.* 59 (5), 960–971.
- 50- Minasny, B., Hartemink, A.E., 2011, Predicting soil properties in the tropics, *Earth-Science Reviews* 106(2011): 52–62.
- 51- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162 (2011) 1–19.
- 52- Nanni, M.R., Demattê, J.A.M., 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (2), 393–407.
- 32- Grevea, M.H., Kheira, R.B., Grevea, M.B., Bøcherb, 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 (2012) 1–10.
- 33- Hahn, C., Gloaguen, R., 2008. Estimation of soil types by non linear analysis of remote sensing data. *Nonlinear Processes Geophys.* 15 (1), 115–126.
- 34- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Jones, M., Thomas, M., 2012. Investigations into soil composition and texture using infrared spectroscopy. *Appl. Environ. Soil Sci.*, 12.
- 35- 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), 1101–1114.
- 36- Jong, S.M.D., Addink, E.A., van Beek, L.P.H., Duijsings, D., 2011. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts. *Catena* 86 (2011) 24–35.
- 37- 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 (2014) 171–184.
- 38- Kempen, B., Brus, D.J., Stoorvogel, J.J., Heuvelink, G., de Vries, F., 2012. Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 2097–2115.
- 39- Kosmas, C., Tsara, M., Moustakas, N., Kosma, D., Yassoglou, N., 2006. Environmentally sensitive areas and indicators of desertification. In: Kepner, W., Rubio, J., Mouat, D., Pedrazzini, F. (Eds.), *Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue*. Springer, Netherlands, pp. 525–547.
- 40- 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*, Volume 114 # 2012 Elsevier Inc. ISSN 0065-2113, DOI: 10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1.
- 41- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Netto, J.M., Robbez-Masson, J.M., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne

Burlington, pp. 163–215.

64- Stevens, A., Van Wesemael, B., Bartholomeus, H., Rosillon, D., Tychon, B., Ben-Dor, E., 2008. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. *Geoderma* 144, 395–404.

65- Stevens, A., Nocita, M., Toth, G., Montanarella, L., vanWesemael, 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>.

66- Stoner, E.R., Baumgardner, M.F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 (6), 5.

67- Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B., Chittleborough, D., 2011, Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*, 11(2011): 123–131.

68- Vašát, R., Kodešová, R., Borůvka, L., Klement, A., Jakšák, 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(2014): 208–218.

69- Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO.. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 2006:131: 59–75.

70- Viscarra Rossel, R.A., Cattle, S.R., Ortega, A., Fouad, Y., 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*. 150: 253–266.

71- Xian-Li, X., Xian-Zhang, P., Bo, S., 2012. Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Properties near a Copper Smelter. *Pedosphere* 22(3): 351–366, 2012. ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P.

72- Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., 2008. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1923–1930.

53- Pasikatan, M.C., Steele, J.L., Spillman, C.K., Haque, E., 2001. Review: Near infrared reflectance spectroscopy for online particle size analysis of powders and ground materials. *J. Near Infrared Spec.* 9: 153–164.

54- Ray, N.C.B.a.R.W., 2001. *The Nature and Properties of Soils: Upper Saddle River*. Prentice Hall, New Jersey.

55- 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 (2011) 84–91.

56- Richter, R., Schläpfer, D., 2002. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: Atmospheric/topographic correction. *Int. J. Remote Sens.* 23 (13), 2631–2649.

57- Sawut, M., Ghulam, A., Tiyip, 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 (2014) 203–210.

58- Scheidegger, A., Borkovec, M., Sticher, H., 1993. Coating of silica sand with goethite: preparation and analytical identification. *Geoderma* 58, 43–65.

59- Schwanghart, W., Jarmer, T., 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography — a case study from south-eastern Spain. *Geomorphology* 126, 252–263.

60- Selige, T., Böhner, J., Schmidhalter, U., 2006. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma* 136, 235–244.

61- Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 988–998.

62- 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(2009): 342–361.

63- 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*, vol. 107. Academic Press,