



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال شانزدهم، شماره‌ی ۵۴
تابستان ۱۳۹۵، صفحات ۲۸۱-۲۶۱

حمیدرضا متین‌فر^۱

فاطمه قدوسی‌فرد^۲

ارزیابی قابلیت تصاویر ابرطیفی در برآورد میزان آلودگی خاک‌های زراعی به عنصر سرب

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۸

چکیده

در یک قرن گذشته فعالیت‌های صنعتی با افزایش میزان عناصر سنگین در خاک جوامع انسانی را با تهدیدی جدی مواجه ساخته است. با این وجود استفاده از روش‌های سنتی در تعیین این عناصر با صرف وقت و هزینه بسیاری همراه می‌باشد. امروزه طیف سنجی در محدوده مادون قرمز نزدیک با بررسی ویژگی طیفی، قابلیت شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد سطح زمین را فراهم کرده است. در این تحقیق با توجه به اهمیت عناصر سنگین در آلودگی محیط تلاش گردید میزان این عناصر با استفاده از جدیدترین تکنیک‌های طیف سنجی و سنجش از دوری برآورد گردد. به همین منظور پس از نمونه برداری از منطقه مورد مطالعه از ۳ تکنیک رگرسیون حداقل مربعات جزئی، طبقه‌بندی جزء پیکسل و شاخص‌های طیفی، میزان سرب با استفاده از طیف اندازه‌گیری شده و تصویر ابرطیفی برآورد گردید. نتایج به‌دست آمده از طیف سنجی بیانگر آن است که محدوده‌های ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتری به دلیل همبستگی با ماده آلی بیش‌ترین تاثیر را در برآورد میزان سرب با استفاده از مدل رگرسیون حداقل

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

E-mail: matinfar44@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشگاه لرستان.

E-mail: fatemeh.ghodoosi94@gmail.com

مربعات جزئی دارد. در ادامه از نسبت مشتق اول در این محدوده (۶۲۰ و ۵۸۰ نانومتری) برای برآورد میزان سرب در تصاویر ابرطیفی استفاده گردید. میزان ضریب تعیین و مربع میانگین خطای باقی مانده به دست آمده در این روش به ترتیب ۰/۵۷۹، ۱/۵۱۷ می‌باشد. همچنین روش طبقه‌بندی $MTMF^3$ با قابلیت مدل‌سازی ۲ بعدی داده قبل از طبقه‌بندی نهایی می‌تواند با آستانه گذاری مناسب به شناسایی دقیق مناطق آلوده کمک نماید.

کلید واژه‌ها: طیف‌سنجی، تصاویر ابرطیفی، سرب، رگسیون حداقل مربعات جزئی.

مقدمه

خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند بوده که حاصل سالیان متوالی فعالیت فاکتورهای خاک‌سازی در طبیعت می‌باشد. برنامه‌ریزی برای داشتن خاکی با کیفیت مطلوب و تولید کننده لازمه بقای انسان است. ورود مواد، ارگانسیم‌های زیستی یا انرژی به درون خاک سبب تغییر کیفیت خاک می‌شود. همین مسئله باعث می‌شود که خاک از حالت طبیعی خود خارج شود. هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده خاک به طوری که استفاده از آن ناممکن گردد آلودگی خاک نامیده می‌شود. آلوده ساختن عبارت است از پخش یا آمیختن مواد خارجی در آب، هوا و خاک به میزانی که کیفیت و خواص فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیک آنها را به گونه‌ای تغییر دهد که برای انسان، گیاه و یا سایر موجودات زنده زیان آور باشد. آلودگی‌ها انواع مختلف دارد از جمله آلودگی آب و خاک، آلودگی هوا، آلودگی‌های بصری و صوتی از انواع مختلف آن‌ها به شمار می‌روند. به علت تأثیرات جدی سه نوع آلودگی هوا، آب و خاک بر سلامت زیست کره بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرند. از جمله اثرات آلودگی خاک شامل اختلال فعالیت‌های بیولوژیک خاک، اثرات سمی روی گیاهان و اثرات زیانبار روی انسان در اثر ورود مواد آلاینده به زنجیره غذایی می‌باشند (چوی^۴ و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۲۳۳-۳۲۲۲).

منابع آلوده کننده خاک شامل فلزات سنگین شامل آرسنیک، کادمیم، نیکل، سرب، کروم، روی، مولیبدن، سلنیم، سموم شیمیایی و علف کش‌ها، حشره کش‌ها، قارچ کش‌ها، کودهای شیمیایی، مواد زائد و فاضلاب‌ها و مواد نفتی می‌باشند. مقادیر فلزات سنگین در خاک و اثرات آن‌ها در اکوسیستم، تحت تأثیر عوامل مختلف طبیعی از جمله مواد مادری، آب‌وهوا، فرآیندهای خاک‌سازی، و فعالیت‌های انسانی مثل صنعت، کشاورزی و حمل‌ونقل است (وی^۵ و

3- Mixture Tuned Matched Filtering

4- Choe

5-Wei

همکاران، ۲۰۰۷: ۵۶۷-۵۷۶). توزیع پیوسته و تجمعی از سرب در نتیجه سرعت در صنعتی شدن و شهرنشینی بوده که سبب مشکلات جدی برای محیط و امنیت غذایی شده است (ژانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۴۶۵-۱۴۷۲). سرب در شکل‌ها و مقادیر مختلف در خاک، سنگ، گیاه و حتی بدن انسان و حیوانات وجود دارد. سرب خالص در طبیعت معمولاً نادر بوده و اغلب به همراه سایر عناصر از قبیل نقره، مس و روی وجود دارد. بیش‌تر تجمع سرب در نتیجه فعالیت‌های انسانی است که برای سلامتی انسان و موجودات زنده سمی می‌باشد (گریفیث^۷، ۲۰۰۲: ۱-۱۵، وو^۸ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۱۰-۲۲۱). امروزه توانایی طیف سنجی در به دست آوردن اطلاعات از سطح زمین و کاهش عملیات میدانی سبب گردیده تا به صورت گسترده مورد استفاده قرار گیرد. طیف سنجی شامل مطالعه نور می‌باشد، بر این اساس نوری که تابعی از طول موج می‌باشد می‌تواند توسط پدیده‌های مختلف جذب، منعکس و پراکنده گردد. ویژگی‌های سطحی مواد ناشی از ترکیبات شیمیایی درون آن‌ها می‌باشد، بنابراین با استفاده از طیف سنجی می‌توان تا حدی از ویژگی‌های درونی مواد آگاهی پیدا کرد. از مزیت‌های دیگر طیف سنجی می‌توان عدم حساسیت این روش به وجود ساختار یا عدم ساختار در پدیده‌های تحت مطالعه را ذکر کرد. همچنین طیف سنجی امکان اندازه‌گیری خصوصیات مواد در محیط طبیعی را نیز فراهم می‌سازد (علوی پناه، ۱۳۸۸: ۲۵-۲۵). اگرچه مطالعات گذشته نشان می‌دهد که طیف سنجی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک در ناحیه طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتری می‌تواند برای کمی کردن شرایط خاک مورد استفاده قرار بگیرد، ولی تا کنون تعیین مستقیم عناصر سنگین در خاک با استفاده از سنجش از دور و طیف سنجی همچون سایر پارامترهای خاک مورد ارزیابی قرار نگرفته است. کاربرد طیف ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک در اندازه‌گیری آزمایشگاهی، اندازه‌گیری میدانی یا تصویری معمولاً هنگامی که با روش‌های سنتی شیمیایی مقایسه می‌گردد با برآورد بهتری همراه بوده است. علاوه بر این، این روش‌ها معمولاً با هزینه کم‌تر، سریع‌تر و در سطح وسیع‌تری قابل استفاده می‌باشند. به عنوان مثال طیف سنجی تصویری این امکان را فراهم می‌سازد که تعداد نمونه‌های (نمونه‌های طیفی) برداشت شده بیش‌تر از روش سنتی باشد. بنابراین توسعه تکنیک‌های سنجش از دوری (طیف سنجی میدانی و یا حتی تصویر برداری با استفاده از هواپیما و ماهواره) می‌تواند پایش عناصر سنگین (در غبار و خاک) را برای محیط و تاثیر بر سلامتی انسان ارزیابی کند. تصاویر ابرطیفی به وسیله ابزاری به نام طیف سنج‌های تصویربرداری ایجاد می‌شوند. طیف سنجی^۹ و تصویر برداری سطح زمین از دور طیف نوری را که از مواد منعکس یا ساطع می‌شود به همراه تغییرات آن در طول موج‌های مختلف مطالعه می‌نماید.

6- Zhang

7- Griffith

8- Wu

9- Spectroscopy

سنجنده‌های ابرطیفی در باندهای طیفی پیوسته، بسیار باریک و متعددی در بخش‌های طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز میانه و مادون قرمز حرارتی تصویر برداری می‌نمایند. این سنجنده‌ها اطلاعات فراوانی در مورد ترکیبات فیزیکی و شیمیایی مواد سطحی و خصوصیات جوی بین سنجنده و سطح مورد سنجش فراهم می‌نماید (علوی پناه، ۱۳۸۸: ۲۵-۴۵).

عموما این اعتقاد وجود دارد که مواد غیر زنده از جمله عناصر سنگین که ویژگی جذبی و انعکاسی را از خود نشان نمی‌دهند، نمی‌توانند مستقیماً در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک شناسایی گردند (وو و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۰۵۹-۱۰۵۰). این در حالی است که بعضی از مطالعات اخیر پیشنهاد می‌کنند که عناصر سنگین از قبیل سرب می‌تواند مستقیماً شناسایی گردد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۴۶۵-۱۴۷۲). مطالعات دیگری پیشنهاد می‌کنند که عناصر سنگین می‌تواند تنها به صورت غیرمستقیم با توجه به اثرات آن‌ها بر روی محتویات خاک از قبیل موادآلی، اکسیدهای آهن و رس که تاثیر مستقیم بر طیف در این محدوده دارند شناسایی گردند (چوی و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۲۲۲-۳۲۳۳، ووهندل^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۰۹-۲۰۱، پاندیت^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰: ۴۱۲۳-۴۱۱۱، ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۴۶۵-۱۴۷۲). تغییرات در ویژگی‌های طیفی بر اثر فعالیت‌های مختلفی که در سطح زمین رخ می‌دهد صورت می‌پذیرد، از جمله این تغییرات می‌تواند اضافه شدن عناصر سنگین به خاک باشد. به عبارت دیگر برای پیش‌بینی دقیق عناصر سنگین بر اساس طیف، نیاز است در ابتدا تاثیر ویژگی‌های مهم خاک که بر روی طیف تاثیر گذار هستند بررسی گردد (روسل^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۶: ۷۵-۵۹، وو و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۶۷-۵۷۸).

مطالعات گذشته نشان می‌دهد عناصر سنگین در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک دارای طیف خاصی بوده و این ویژگی می‌تواند برای شناسایی و ردیابی این عناصر مفید باشد (کمپر^{۱۳} و سومر^{۱۴}، ۲۰۰۳: ۳۳۳-۳۴۳، چوی و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۲۲۲-۳۲۳۳). در عمل بیش‌تر طیف پیکسل‌های استخراج شده منحصراً شامل عناصر سنگین نبوده و شامل عناصر مختلف می‌باشد (کمپر و سومر، ۲۰۰۳: ۳۳۳-۳۴۳؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۱۳۵-۲۱۶۲). بنابراین طیف ترکیبی یک موضوع مهم برای حل کردن مشکل روش‌های طیف سنجی می‌باشد. در سال‌های اخیر آنالیز طیف مختلط (SMA^{۱۵}) به صورت گسترده برای تصاویر چند طیفی و ابرطیفی به کار برده می‌شود. این تکنیک برای تعیین درصد حضور خاک، گیاه و دیگر مواد معدنی در هر پیکسل که عضو مرجع نامیده می‌شود به کار برده

10- Vohland

11- pandit

12- Rossel

13- Kemper

14- Sommer

15- Spectral mixture analysis

می‌شود (گارسیا-هارو و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۱۳۵-۲۱۶۲). روش SMA انعکاس حاصل از هر پیکسل را به درصد حضور اجزاء تشکیل دهنده هر پیکسل تبدیل می‌کند (کمپر و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱-۱۳). آنالیز طیف مختلط هم اکنون ابزاری قابل دسترس است که می‌تواند برای کمی کردن اطلاعات در مورد عناصر سنگین در خاک مورد استفاده قرار گیرد (کمپر و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱-۱۳، پلازا^{۱۶} و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۲۳۴-۱۲۴۵، کمپر و سومر، ۲۰۰۳: ۳۳۳-۳۴۳، گارسیا-هارو و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۱۳۵-۲۱۶۲).

کوئیسترا^{۱۷} و همکاران (۲۰۰۱: ۹۷-۱۰۵) از طیف سنجی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک برای ارزیابی محتویات خاک در حاشیه رودخانه‌ها در هلند استفاده کرد و نتیجه گرفت که میزان تجمع عناصر سنگین در خاک تابعی از ظرفیت تبادل خاک می‌باشد.

مالی^{۱۸} و ویلیامز^{۱۹} (۱۹۹۷: ۳۴۶۷-۳۴۶۱)، محدوده مادون قرمز نزدیک را برای برآورد کمی عناصر سنگین به کار بردند، که در این مطالعه از میزان ماده آلی براساس معادله رگرسیون چند متغیره برای برآورد کادمیم، مس، آهن، منیزیم، نیکل، سرب و روی استفاده گردید.

یک رابطه معنی‌دار بین عناصر سنگین (کادمیم، جیوه و سرب) در محدوده طیفی ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر که در ارتباط با ماده آلی می‌باشد وجود دارد (برای^{۲۰} و همکاران، ۲۰۰۹: ۴۴۲-۴۳۳، پاندیت و همکاران، ۲۰۱۰: ۴۱۲۳-۴۱۱۱). سرب خاک می‌تواند همچنین به صورت غیرمستقیم با استفاده از طیف سنجی انعکاسی و همبستگی با اکسید آهن برآورد گردد. تحقیقات اخیر یک طیف مرتبط با سرب را با استفاده از طیف سنجی‌های آزمایشگاهی به دست آورده‌اند، این طیف در محدوده ۸۳۸ نانومتری، ۱۹۳۰ و ۲۱۴۸ نانومتری دارای پیک می‌باشد.

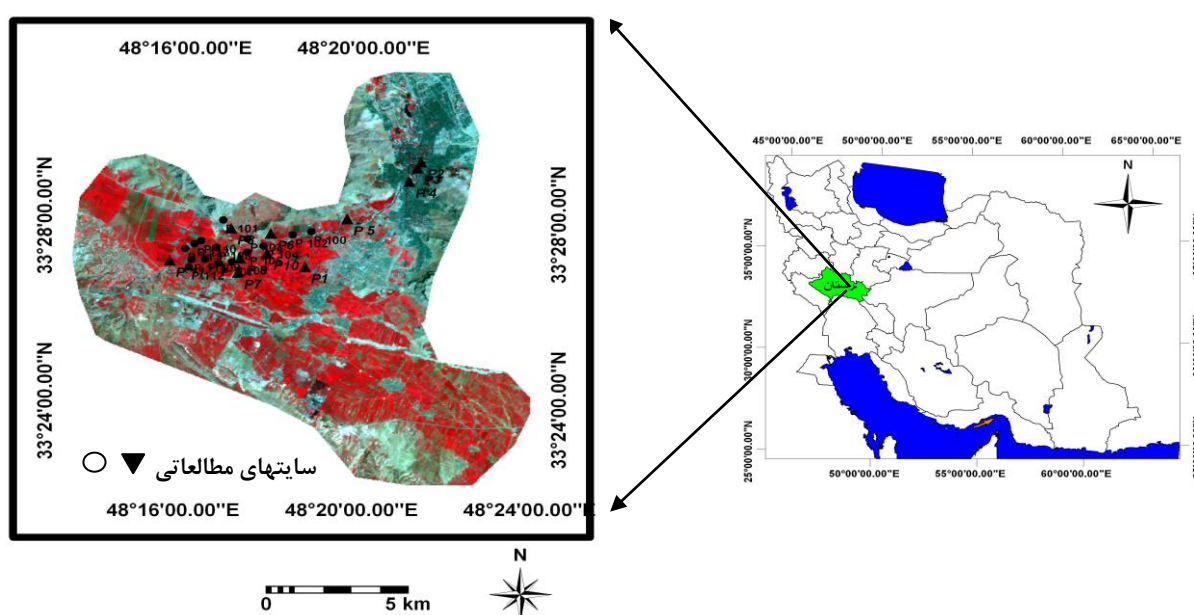
با این وجود دو ناحیه طیفی بین ۸۴۰ تا ۹۰۰ نانومتری و ۲۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتری به علت سیگنال ضعیف مفید بوده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۴۶۵-۱۴۷۲). در مطالعه دیگری پاندیت و همکاران (۲۰۱۰: ۴۱۲۳-۴۱۱۱) برای اندازه‌گیری میزان سرب در هوای آزاد طول موج‌های ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتری را به دلیل ایجاد خطا (باندهای جذب آب) حذف کردند. در این مطالعه میزان سرب با میزان انعکاس خاک رابطه معکوس داشته و همچنین سرب تابعی از تغییرات طیف خاک بود.

در ابتدا هدف از این تحقیق شناسایی تغییرات طیفی مرتبط با فلزات سنگین در خاک با استفاده از طیف سنجی بوده و در ادامه با استفاده از تصاویر فراطیفی توزیع فلزات سنگین مشخص می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه واقع در جنوب غربی شهر خرم‌آباد قرار گرفته است، این ناحیه دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب است و فصل مرطوب از آبان ماه شروع و در اردیبهشت ماه خاتمه می‌یابد، میانگین بارندگی سالیانه آن ۵۱۶ میلی‌متر و حداکثر بارندگی در ماه فروردین به مقدار ۷۸/۱ میلی‌متر گزارش شده است (جهاد سازندگی استان لرستان، ۱۳۷۲).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری

با توجه به نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران رژیم رطوبتی خاک‌های منطقه زیرک^{۲۱} می‌باشد که مؤید اقلیم مدیترانه‌ای (نیمه‌خشک) در این ناحیه می‌باشد. رژیم حرارتی آن ترمیک^{۲۲} است. منابع آب سطحی آن از رودخانه خرم‌آباد که از ارتفاعات شمالی شهر سرچشمه می‌گیرد که pH آن بین ۷/۵ الی ۸/۱ متغیر است، تامین می‌شود. منابع آب زیرزمینی آن نیز شامل چشمه چنگائی و چاه‌های عمیق است که pH آن‌ها ۷/۴ و هدایت الکتریکی آن‌ها ۰/۵۷ ds/m می‌باشد. ویژگی‌های خاک منطقه خاکی عمیق به رنگ قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره با بافت سنگین^{۲۳} و ساختمان دانه‌ای و در بعضی از قسمت‌ها با مقداری سنگریزه و قلوه‌سنگ که بر روی لایه‌ای به رنگ

21- xeric

22- thermic

23- si.cl

قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره با بافت خیلی سنگین^{۲۴} ساختمان مکعبی گوشه‌دار^{۲۵} متوسط نسبتاً قوی قرار گرفته است. لایه‌های فوق بر روی لایه‌هایی به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز تا قهوه‌ای متمایل به قهوه‌ای تیره با بافت سنگین تا خیلی سنگین و ساختمان مکعبی گوشه‌دار متوسط نسبتاً قوی که همراه مقدار زیادی آهک است قرار گرفته‌اند. این خاک‌ها دارای افق‌های مشخصه کلسیک^{۲۶}، کمبیک^{۲۷} و اکریک^{۲۸} بوده که نشان دهنده جابجایی آهک و تجمع آن در لایه‌های زیرین خاک می‌باشد (موسسه خاک و آب، ۱۳۷۲ و کلید رده بندی خاک‌ها، ۲۰۱۰: ۳-۱۵۳).

همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد ابتدا با بررسی‌های میدانی تعداد ۱۷ ناحیه (هر ناحیه شامل ۵ نقطه نمونه برداری است) برای نمونه برداری انتخاب گردید. قابل ذکر است محل‌های نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب گردید که احتمال آلودگی در آن‌ها زیاد باشد، نواحی یاد شده براساس شبکه آبیاری منطقه که از فاضلاب تغذیه می‌شوند انتخاب گردیده است. سپس از این نواحی دو نوع نمونه برداری خاک صورت گرفت. ابتدا با توجه به اهمیت سرب بر میزان انعکاس خاک سطحی تلاش گردید این لایه بدون تغییر در ظرفی که از قبل تعیین شده بود به آزمایشگاه برای طیف سنجی انتقال یابد و بخش دیگر نمونه که تا عمق ۲۰ سانتی متری صورت گرفته بود برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه خاک شناسی منتقل گردید (نشریه فنی ۸۹۳، موسسه خاک و آب).

داده‌های مورد استفاده و پیش پردازش تصاویر

در این پژوهش از داده‌های هایپریون در سطح پردازشی L1R استفاده گردید. این داده‌ها شامل تصاویر اصلاح شده به لحاظ رادیومتریکی ($100 \times \text{watts}/(\text{sr-micron-m}^2)$) هستند و به فرمت HDF و فایل MTL با فرمت ASCII ارائه می‌شوند. مراحل اصلاحات انجام یافته بر روی تصویر به شرح زیر می‌باشد:

الف- حذف باندهای بد

در این پژوهش بعد از بررسی باندها، باندهای مناسب مورد استفاده قرار گرفت. برای حذف باندهای نامناسب از تفسیر بصری استفاده گردید. بدین معنا که تک تک باندها مورد ارزیابی قرار گرفت و باندهایی که حاوی نویز یا به صورت تیره بودند از مجموع باندها حذف شدند. در مجموع از ۲۴۲ باند ۱۵۷ باند برای پردازش انتخاب گردید. به

24- si.c
25- 3mabk
26- calcic
27- cambic
28- ochric

علت این‌که داده مورد استفاده در این تحقیق Level-1R بود، برای تغییر مقیاس در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک، دادگان بر عدد ۱۰۰ تقسیم گردید (چوی و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۲۳۳-۳۲۲۲).

ب- تغییر مقیاس

برای تبدیل داده‌های رقومی پیکسلی به رادیانس در این تصاویر مرحله تغییر مقیاس برای این تصاویر انجام می‌شود. که با تقسیم داده‌ها به عدد فاکتور مقیاس این مرحله صورت می‌گیرد به عنوان مثال در داده‌گان هایپریون در سطوح پردازشی دیگر مانند L1_A, L1_B و L1_A3 از عدد ۴۰ برای VNIR و ۸۰ برای SWIR استفاده می‌شود. در (جدول ۱) این محصولات با ویژگی‌های آن‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های سطوح مختلف پردازشی در تصاویر سنجنده هایپریون

سطح پردازشی داده‌گان هایپریون	. cal	. L1 (L1R)	. L1_A	. L1_A3	. L1_B
نوع داده	Unit16	Unit16	Unit16	Unit16	Unit16
فایل Gain	PriRadL0. Bin	Hypgain. Txt	HypeGain_revA . Dat	HypeGain_revB . Dat	HypeGain_revB . Dat
فاکتور تغییر مقیاس در VNIR	۱۰۰	۱۰۰	۴۰	۴۰	۴۰
فاکتور تغییر مقیاس در SWIR	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	۸۰	۸۰

ج- حذف پیکسل‌های معیوب

در سنجنده‌هایی مانند هایپریون، ضعف کالیبراسیون در آشکارسازهای محدوده‌ی VNIR و SWIR، راه‌راه شدگی‌های عمودی یا اصطلاحاً "Streak" هایی در برخی از پیکسل‌ها ایجاد خواهد کرد. بیش‌تر این پیکسل‌ها دارای داده‌های کم ارزش یا بی‌ارزش هستند که حذف گردیدند.

الف- تعیین میزان سرب با استفاده از دستگاه جذب اتمی

برای اندازه‌گیری سرب پس از آسیاب کردن نمونه‌های خاک، با هضم در اسید کلریدریک ۶ مولار نمونه‌ها سوزانده و یا به اصطلاح خاکستر شدند، سپس با اسید نیتریک ۱ درصد رقیق سازی شده و در ادامه با استفاده از سیستم کوره گرافیتی در دستگاه جذب اتمی میزان عنصر سرب اندازه‌گیری گردید (نشریه فنی ۸۹۳، موسسه خاک و آب).

ب- برآورد میزان سرب با استفاده از طیف سنجی

پس از انتقال نمونه‌های سطحی خاک به آزمایشگاه به منظور اندازه‌گیری خصوصیات طیفی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در فضای آزمایشگاه قرار گرفت تا خشک گردد (نشریه فنی ۸۹۳، موسسه خاک و آب).

جهت انجام آزمایش از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Jenwey استفاده شد. پس از کالیبره نمودن دستگاه، انعکاس طیفی هر نمونه در محدوده ۲۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتری به فواصل ۱۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

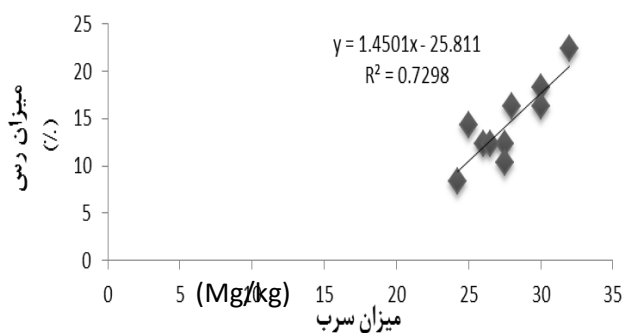
یافته‌ها و بحث

برای پیش‌بینی دقیق عناصر سنگین بر اساس طیف، نیاز است در ابتدا تاثیر ویژگی‌های مهم خاک که بر روی طیف تاثیرگذار هستند بررسی گردد (وو و همکاران، ۲۰۰۵: b: ۱۰۵۱-۱۰۵۹، روسل و همکاران، ۲۰۰۶: ۵۹-۷۵، میناسنی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۶۲-۱۵۵). بر این اساس نتایج حاصل از آنالیز خاک شامل بافت، میزان ماده آلی و میزان سرب برای ۱۰ نقطه نمونه‌برداری محاسبه گردید نتایج در (جدول ۲) ارائه شده است.

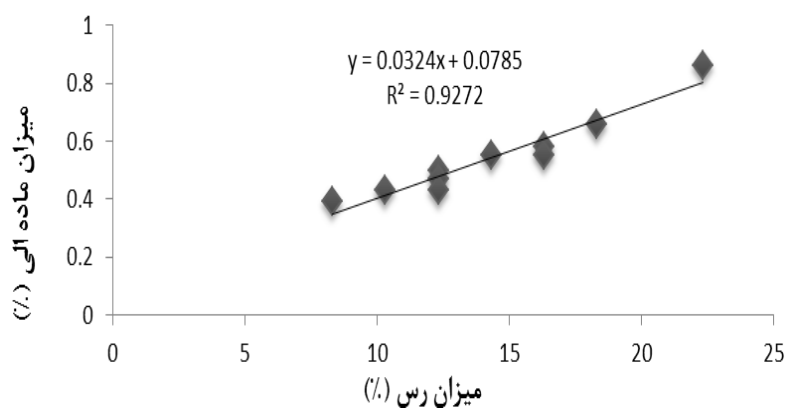
جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های نقاط شاهد منطقه مطالعاتی

شماره نمونه	درصد ماده آلی	درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	بافت خاک	میزان سرب (mgr/kg)
۱	۰/۸۶	۲۲/۳۲	۱۹/۶۸	۵۸	سیلتی- لومی	۳۲
۲	۰/۶۶	۱۸/۳۲	۲۷/۶۸	۵۴	سیلتی- لومی	۳۰
۳	۰/۵۸	۱۶/۳۲	۳۳/۶۸	۵۰	لوم	۲۸
۴	۰/۵۵	۱۶/۳۲	۳۱/۶۸	۵۲	سیلتی- لومی	۳۰
۵	۰/۵۵	۱۴/۳۲	۳۹/۶۸	۴۶	لوم	۲۵
۶	۰/۵	۱۲/۳۲	۵۸	۲۹/۶۸	سیلت	۲۶
۷	۰/۴۷	۱۲/۳۲	۳۵/۶۸	۵۲	سیلت لوم	۲۷/۵
۸	۰/۴۳	۱۲/۳۲	۳۱/۶۸	۵۶	سیلت لوم	۲۶/۵
۹	۰/۴۳	۱۰/۳۲	۴۵/۶۸	۴۴	لوم	۲۷/۵
۱۰	۰/۳۹	۸/۳۲	۲۳/۶۸	۶۸	سیلتی- لومی	۲۴/۲۵

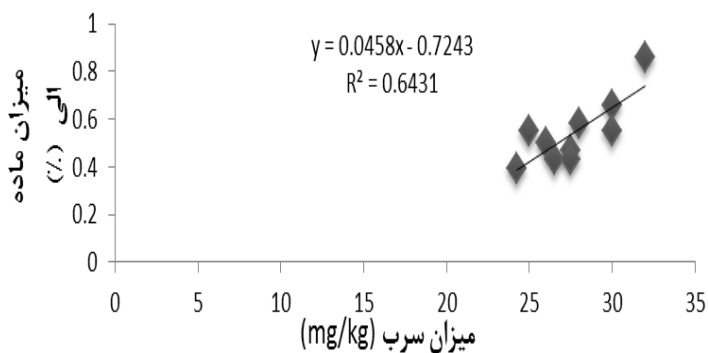
همانگونه که مشاهده می‌گردد بافت خاک منطقه مورد مطالعه از دو نوع لومی و سیلتی لومی می‌باشد. این نوع خاک‌ها به دلیل برخورداری از میزان بالای رس توانایی بالایی در نگهداری عناصر سنگین و ماده آلی را داشته و مانع آبشویی آن‌ها به اعماق خاک می‌گردد. ضریب تعیین (R^2) به دست آمده بین میزان رس، سرب و درصد ماده آلی در ۱۷ نقطه نمونه برداری در این مطالعه نیز حاکی از این امر است (شکل ۲، ۳ و ۴).



شکل ۲: میزان همبستگی سرب و رس



شکل ۳: میزان همبستگی رس و ماده آلی

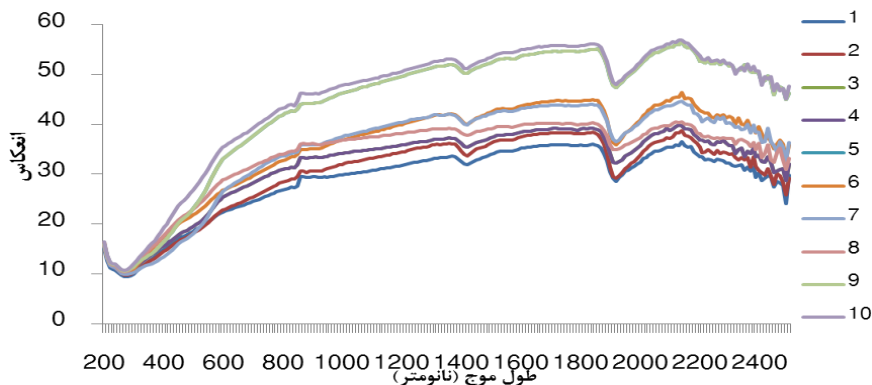


شکل ۴: میزان همبستگی سرب و ماده آلی

برآورد میزان سرب با استفاده از طیف سنجی آزمایشگاهی

الف- نتایج حاصل از طیف سنجی

برای شناسایی اجزای خاک طبق تحقیقات گذشته انعکاس در محدوده طول موج مرئی و مادون قرمز نزدیک و کوتاه در ناحیه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر مفید می‌باشد (وو و همکاران، ۲۰۰۵: ۸۷۳-۸۷۸، ووو و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۶۷-۵۷۸، بن-دور^{۲۹} و همکاران، ۲۰۰۹: ۳۵-۵۵، میناسنی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۵۵-۱۶۲، بیلجیلی^{۳۰} و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۲۹-۲۳۸). نتایج انعکاس حاصل از نمونه‌های سطحی با استفاده از دستگاه اسپکترومتر و در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتری در فواصلی ۱۰ نانومتری در (شکل ۵) مشاهده می‌شود. همان گونه که در (شکل ۵) نیز مشخص است باندهای جذب آب در محدوده ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر بر روی طول موج تاثیر گذار بوده‌اند.



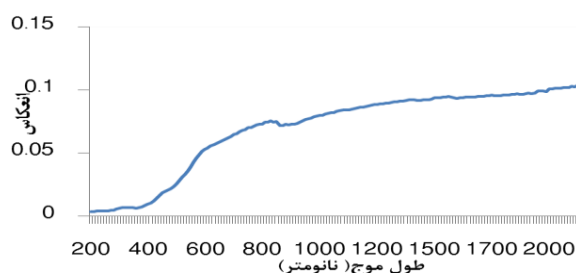
شکل ۵: انعکاس طیفی نمونه‌های خاک در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتری

فرض اولیه در تشخیص عناصر سنگین آن است که با افزایش میزان آن‌ها انعکاس خاک کاهش می‌یابد (پاندیت و همکاران، ۲۰۱۰). نمودار طیفی نمونه‌های ۱، ۲، ۹ و ۱۰ نیز از لحاظ بصری با این فرض سازگار بوده و نمونه ۱ با بیش‌ترین میزان سرب انعکاس کم‌تری داشته و نمونه شماره ۱۰ با کم‌ترین میزان سرب بیش‌ترین انعکاس را دارد. البته باید توجه داشت که میزان رس و ماده آلی نیز بر انعکاس نمونه‌های خاک نیز تاثیرگذار بوده است.

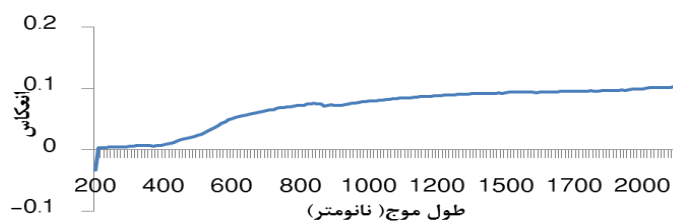
ب- رگرسیون حداقل مربعات جزئی

مهم‌ترین روش‌های کالیبراسیون چند متغیره در ارتباط با طیف مادون قرمز نزدیک با اندازه‌گیری خصوصیات خاک شامل حداقل مربعات جزئی، روش‌های جزء پیکسل، تجزیه مولفه‌های اصلی و رگرسیون چندگانه سازگار شده اسپیلان (MARS) می‌باشند (کوستر و همکاران، ۲۰۰۱: ۹۷-۱۰۵، پاندیت و همکاران، ۲۰۱۰: ۴۱۱۱-۴۱۲۳).

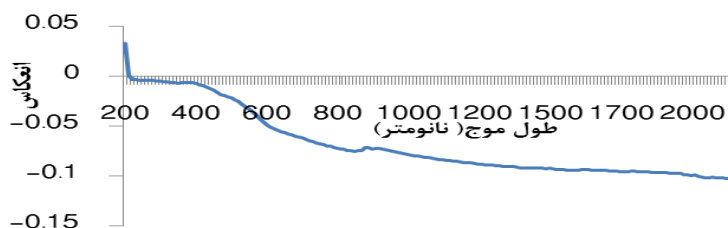
در این تحقیق با استفاده از روش حداقل مربعات میزان سرب به صورت مستقیم (با استفاده از طیف) و به صورت غیرمستقیم با استفاده از طیف و دیگر عناصر خاک شناسایی گردید. در این روش برآورد میزان سرب از ۴ روش متفاوت شامل ۱- برآورد سرب با استفاده از طیف در محدوده ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتری ۲- برآورد با استفاده از میزان رس ۳- برآورد با استفاده از میزان ماده آلی و طیف ۴- برآورد با استفاده از میزان رس، ماده آلی و طیف انجام پذیرفت. قابل ذکر است که در این روش ۱۰ نمونه برای مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل و ۷ نمونه برای کالیبراسیون مدل استفاده شد. رگرسیون حداقل مربعات جزئی به دلیل استفاده از روش تجزیه مولفه‌های اصلی می‌تواند همبستگی موجود بین باندهای مختلف را از بین برده و علاوه بر اختیار قرار دادن داده‌های مناسب‌تر دقت برآورد را نیز افزایش دهد. در شکل‌های (۶، ۷، ۸ و ۹) نتایج حاصل از اولین تجزیه مولفه‌های اصلی برای چهار روش متفاوت مشاهده می‌گردد.



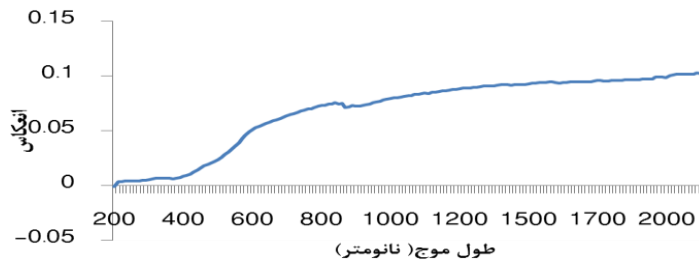
شکل ۶: اولین تجزیه مولفه اصلی برای طول موج ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتر



شکل ۷: اولین تجزیه مولفه اصلی برای طول موج ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتر و میزان رس



شکل ۸: اولین تجزیه مولفه اصلی برای طول موج ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتر، میزان رس و ماده آلی



شکل ۹: اولین تجزیه مولفه اصلی برای طول موج ۲۰۰ تا ۲۱۰۰ نانومتر و میزان ماده آلی

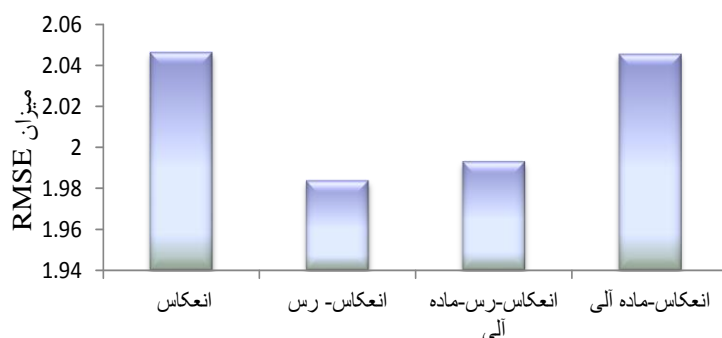
در ادامه از اولین تجزیه مولفه اصلی به دلیل این که بیش از ۹۵ درصد واریانس بین داده‌ها را افزایش داده بود برای برآورد میزان رس با استفاده از مدل حداقل مربعات جزئی استفاده گردید.

این مدل همچنین با تعیین وزن به هریک از پارامترهای مستقل می‌تواند اهمیت هر یک را در برآورد میزان سرب تعیین کند که این ارزش به عنوان VIP یا مهم‌ترین پارامترها شناخته می‌شود. که بر طبق نتایج آن محدوده طیفی ۵۰۰ تا ۷۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و بالای ۲۰۰۰ نانومتری در برآورد میزان سرب ارزش بالایی دارد.

با توجه به تحقیقات گذشته که تعیین و کمی کردن سرب و دیگر عناصر سنگین را به صورت غیرمستقیم و در ارتباط با دیگر کانی‌های قابل تشخیص (ماده آلی، اکسید آهن و رس) ذکر کرده‌اند، می‌توان این گونه استنباط کرد که همبستگی بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتری در ارتباط با میزان ماده آلی (یاولین و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۰-۱۶) می‌باشد زیرا این ماده باعث نگهداری سرب می‌شود. همچنین محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ را می‌توان در اثر تجمع اکسید آهن (بن-دور و همکاران، ۲۰۰۹: ۳۵-۵۵، بن-دور و بانین^{۳۱}، ۱۹۹۵: ۳۶۴-۳۷۲) و ارتباط آن با سرب ذکر کرد. ناحیه بالای ۲۰۰۰ را نیز می‌توان به رس نسبت داد (چابریلات^{۳۲} و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۳۱-۴۴۵). البته به صورت کلی می‌توان اظهار داشت که خاک‌های با بافت نرم نسبت به خاک‌های با بافت درشت تیره‌تر بوده و در نتیجه خاک با میزان بیش‌تر شن و سیلت (<۰/۰۰۲ میلی‌متر) انعکاس طیفی بیش‌تری از کانی‌های رسی (>۰/۰۰۲ میلی‌متر) به علت میزان آب کم‌تر دارند (به علت ظرفیت نگهداری آب توسط رس).

31- Banin

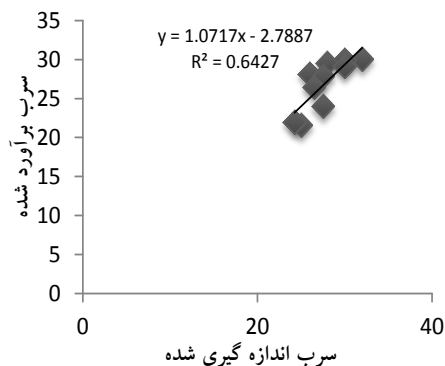
32- Chabrilat



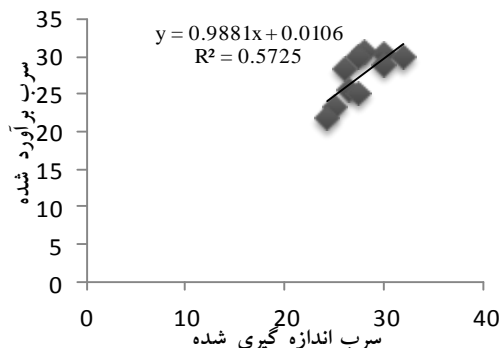
شکل ۱۰: میزان مجذور مربع میانگین خطا حاصل از روش های مختلف

صحت‌سنجی

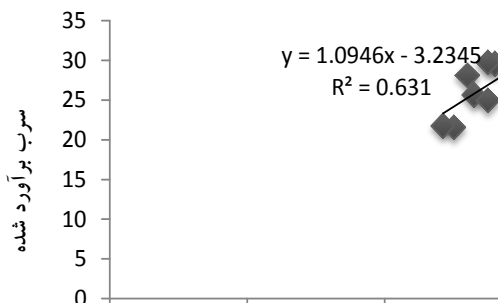
روش صحت‌سنجی مورد استفاده در این مدل‌ها صحت‌سنجی سرتاسری بوده که برای برآورد دقت در هر بار یک نمونه کنار گذاشته شده و میزان دقت برآورد می‌گردد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی سراسری و همچنین کالیبراسیون نشان می‌دهد که مدل‌های ترکیب شده با رس با کم‌ترین میزان مجذور مربع میانگین خطا با بهترین برآورد همراه هستند (شکل ۱۰).



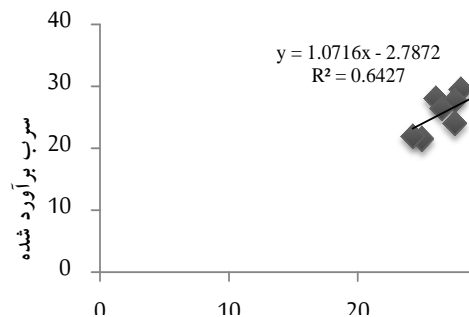
شکل ۱۲: برآورد با استفاده از انعکاس و رس



شکل ۱۱: برآورد با استفاده از انعکاس



شکل ۱۴: برآورد با استفاده از انعکاس و ماده آلی



شکل ۱۳: برآورد با استفاده از انعکاس

جدول ۳- میزان همبستگی و سطح معنی داری برای روش‌های مختلف

سطح معنی داری	میزان همبستگی	روش
۰/۰۵	۰/۷۵۷	انعکاس
۰/۰۱	۰/۸۰۲	انعکاس-رس
۰/۰۱	۰/۸۰۲	انعکاس-رس-ماده آلی
۰/۰۱	۰/۷۹۴	انعکاس- ماده آلی

نتایج حاصل از همبستگی، ضریب تعیین و سطح معنی داری برای هر یک از روش‌ها در جدول (۳) و شکل‌های (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) مشاهده می‌گردد. که مدل انعکاس و رس با همبستگی ۸۰ درصد و سطح معنی داری ۰/۰۱ بهترین روش در برآورد میزان سرب می‌باشد.

ح- شاخص سرب

شاخص‌ها (روابط) به عنوان یکی از روش‌های ساده و سریع برای به دست آوردن اطلاعات کمی و کیفی از داده‌های سنجش از دور معرفی می‌باشند. قابلیت این شاخص‌ها این است که، در بعضی مواقع می‌توان از ارزش پیسکل بدون تصحیح اتمسفری نیز استفاده کرد، هر چند که مطمئناً استفاده از انعکاس نتایج بهتری را به دنبال دارد. در این تحقیق با توجه به رابطه انعکاس و ماده آلی میزان سرب با استفاده از تصاویر ابرطیفی محاسبه گردد. به همین منظور با توجه به رابطه مشتق اول طیف با خصوصیات خاک مشتق اول طیف در تمامی نواحی طبق رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$d\lambda_i = \frac{(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه $d\lambda$ مشتق اول طیف در طول موج λ

λ طول موج

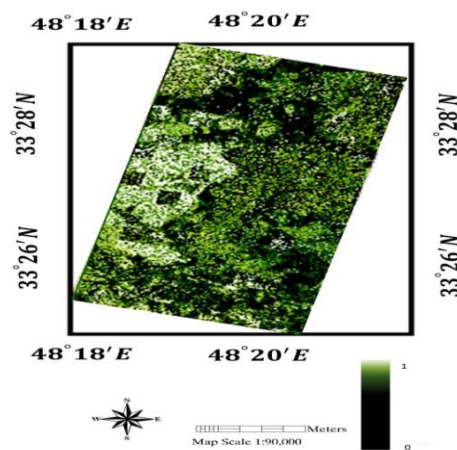
$\Delta\lambda$ فاصله طیفی بین طول موج λ_{i+1} و λ_{i-1} می‌باشد.

نتایج حاصل از مشتق اول طیف و میزان ماده آلی بیانگر آن است که میزان ماده آلی با رابطه به دست آمده زیر (رابطه ۲) قابل برآورد می‌باشد.

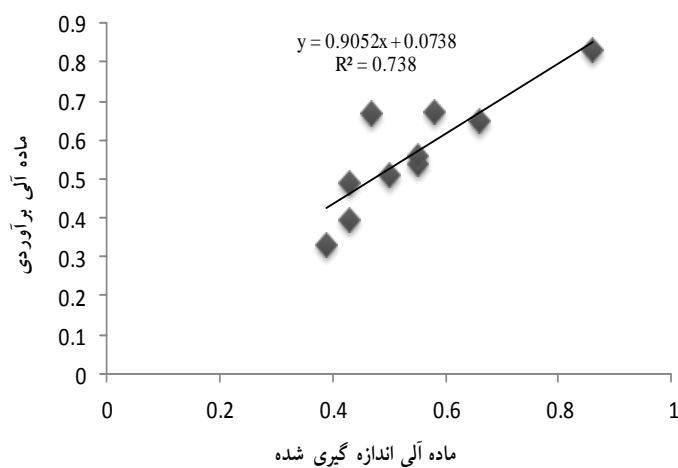
$$oc = \frac{\log 10 \left| \frac{1}{d\lambda_{620}} \right|}{\log 10 \left| \frac{1}{d\lambda_{570}} \right|} \quad \text{رابطه (۲)}$$

OC = میزان ماده آلی

اعداد به دست آمده از این شاخص در محدوده ۱ و ۰ بیانگر میزان ماده آلی در سطح منطقه می‌باشند (شکل ۱۵).
میزان ماده آلی برآوردی حاصل از این روش با ۱۰ نقطه زمینی اندازه‌گیری شده مقایسه گردید که میزان مربع خطای باقی مانده حاصل از این روش ۰/۰۷۵۱۹۴ می‌باشد. همچنین میزان ضریب تبیین به دست آمده ۰/۷۳۸ است (شکل ۱۶).



شکل ۱۵: میزان ماده آلی به دست آمده از رابطه (۲)



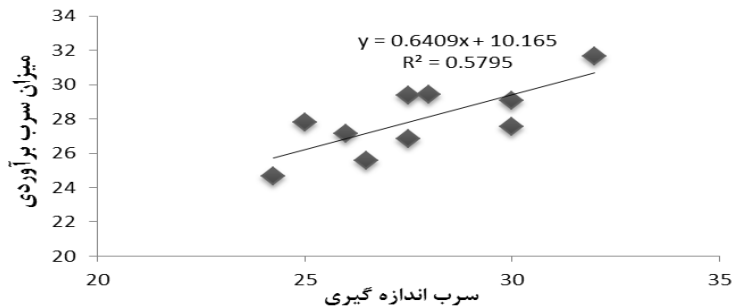
شکل ۱۶: ضریب تبیین به دست آمده برای ماده آلی اندازه‌گیری و برآورد شده

همبستگی به دست آمده بین ماده آلی و سرب همان‌گونه که در رابطه (۳) مشاهده می‌شود تابعی از رابطه زیر می‌باشد.

$$Pb = 0.458 \times OC - 0.7243$$

رابطه (۳)

که در این رابطه میزان سرب با استفاده از ماده آلی محاسبه می‌گردد. ضریب تعیین به دست آمده و مربع میانگین خطا به دست آمده حاصل از این روش به ترتیب ۰/۵۷۹ و مربع میانگین خطا باقی مانده نیز ۱/۵۱۷ می‌باشد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: ضریب تعیین به دست آمده برای سرب اندازه گیری شده و برآورد شده

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به خوبی بیانگر آن است که استفاده از محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌تواند در شناسایی عناصر سنگین بکار گرفته شود. رگرسیون حداقل مربعات جزئی به دلیل دو خصوصیت ویژه آن که شامل استفاده از تعداد زیادی متغیر مستقل و تعداد نمونه کم می‌باشد، می‌تواند میزان سرب را براساس طیف اندازه گیری شده برآورد کند. این قابلیت علاوه بر آن می‌تواند هزینه‌های آزمایش‌های شیمیایی را کاهش داده و باعث صرفه جویی در زمان گردد. نکته قابل توجه در این تحقیق همبستگی بالای سرب با میزان رس و ماده آلی است. تاثیر (وزن) بالای طول موج ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتری در برآورد سرب را می‌توان به دلیل ماده آلی ذکر کرد. لذا به نظر می‌رسد برآورد عناصر سنگین در مناطق با بافت رسی که توانایی زیادی در نگهداری ماده آلی دارند می‌تواند با دقت بالاتری صورت پذیرد. با این وجود می‌توان بیان داشت که خاک‌های رسی به دلیل رنگ و بافت خود می‌توانند به صورت یکنواخت تاثیر باندهای مختلف در برآورد عناصر سنگین را کاهش داده و خود با وزن بیشتری در برآورد عناصر سنگین به کار برده شوند.

استفاده از روش طبقه‌بندی جزء پیکسل به ویژه طبقه‌بندی به روش MTNF این امکان را برای تولید کننده به وجود می‌آورد که قبل از خروجی نهایی بتواند با تعیین آستانه نقاطی که حداکثر احتمال حضور پدیده را دارند شناسایی گردند. با توجه به این که عناصر سنگین معمولاً جزئی از خاک را تشکیل می‌دهند و به سادگی قابل شناسایی نیستند می‌تواند مفید واقع شود.

استفاده از شاخص‌ها یا روابط برای برآورد میزان سرب با استفاده از تصاویر ابر طیفی می‌تواند زمانی موفقیت آمیز باشد که رابطه این عناصر با دیگر خصوصیات خاک مورد شناسایی قرار گیرد. به عنوان مثال همان گونه که در این تحقیق نیز مشاهده گردید ناحیه ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر به دلیل جذب توسط ماده آلی و رابطه آن با سرب می‌تواند در ایجاد شاخص‌های مناسب جهت شناسایی سرب به کار گرفته شود.

نتایج حاصل از مدل PLSR، MTMF و شاخص سرب نشان می‌دهد که روش‌های به کار گرفته شده به خوبی توانایی شناسایی سرب را دارا هستند. با این تفاوت که خروجی‌های حاصل از هر یک متفاوت به صورت عدد، طبقه بندی و تصویر می‌باشد که می‌تواند با توجه به هدف مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- علی احيایی، مریم؛ بهبهانی‌زاده، علی اصغر (۱۳۷۲)، «شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک»، *نشریه فنی*، شماره ۸۹۳، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- جهاد سازندگی استان لرستان (۱۳۷۲)، «کارنامه پژوهش سال، خرم آباد»، معاونت آموزش و تحقیقات جهاد سازندگی استان لرستان.
- علوی‌پناه، س. ک (۱۳۸۸)، «*اصول سنجش از دور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی*»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- کشمیری، م؛ سپهوند، م (۱۳۷۲)، «مطالعات خاک‌شناسی استان لرستان»، تهران، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- Ben-Dor, E., Banin, A., (1995), "Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties", *Soil Science Society of America Journal*, 59 (2): 364-372.
- Ben-Dor, E., Chabrilat, S., Demattê, J., Taylor, G., Hill, J., Whiting, M., Sommer, S., (2009), "Using imaging spectroscopy to study soil properties"., *Remote Sensing of Environment*, 113: S38-S55.
- Bilgili, A., Van Es, H., Akbas, F., Durak, A., Hively, W., (2010), "Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey", *Journal of Arid Environments*, 74: 229-238.
- Bray, J., Rossel, R., McBratney, A., (2009), "Diagnostic screening of urban soil contaminants using diffuse reflectance spectroscopy", *Australian Journal of Soil Research*, 47: 433-442.
- Chabrilat, S. Goetza, A. Krosley, L. and Olsenc, H., (2002), "Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution", *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3): 431-445.
- Choe, E., Meer, F., Ruitenbeek, F., Werff, H., De Smeth, B., Kim, K., (2008), "Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain, *Remote Sensing of Environment*, 112: 3222-3233.
- Garcia-Haro, F., Sommer, S., Kemper, T., (2005), "A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA)", *International Journal of Remote Sensing*, 26 (10): 2135-2165.
- Griffith, D., (2002)., "The Geographic distribution of soil lead concentration: description and concerns, *URISA*, 14 (1): 1-15.
- Kemper, T., Sommer, S., (2003), "Mapping and monitoring of residual heavy metal contamination and acidification risk after the Aznalcóllar mining accident (Andalusia, Spain) using field and airborne hyperspectral data", In: The 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, *Herrsching*: 333: 343.

- Kemper, T., Garcia-Haro, F.J., Preissler, H., Mehl, W., Sommer, S., (2000), "A multiple endmember unmixing approach for mapping heavy metal contamination after the Do? ana mining accident (Seville, Spain)", 2nd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Enschede, 2000, pp 11-13, European Association of Remote Sensing Laboratories, pp 11-13.
- Key to soil Taxonomy, (2010), "Soil Survey Staff, United States Department of Agriculture: 3-153.
- Kooistra, L., Wehrens, R., Leuven, R., Buydens, L., (2001), "Possibilities of visible–near-infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains", *Analytica Chimica Acta*, 446 (1-2): 97-105.
- Malley, D., Williams, P., (1997)., "Use of near-infrared reflectance spectroscopy in prediction of heavy metals in freshwater sediment by their association with organic matter", *Environmental Science and Technology*, 31 (12): 3461-3467.
- Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A., Brough, D., Murphy, B., (2009), "Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties", *Geoderma*, 153: 155-162.
- Pandit, M., Filippelli, M., Li, L., (2010), "Estimation of heavy-metal contamination in soil using reflectance spectroscopy and partial least-squares regression", *International Journal of Remote Sensing*, 31(15): 4111-4123.
- Plaza, A., Martínez, P., Pérez, R., Plaza, J., (2002), "Spatial / spectral endmember extraction by multidimensionalISPRS Annals of the Photogrammetry", *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40 (9): 1234-1245.
- Rossel, R., Walvoort, D., Mcbratney, A., Janik, L., Skjemstad, J., (2006), "Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties", *Geoderma*, 131: 59-75.
- Vohland, M., Bossung , C., Frund, H., (2009), "A spectroscopic approach to assess trace–heavy metal contents in contaminated floodplain soils via spectrally active soil components", *Plant Nutrition and Soil Science*, 172 (2): 201-209.
- Wei, L., Tieyu, W., Yonglong, L., John, P. G., Yajuan, S., Yuanming, Z., et al., (2007), Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils, *Environmental Pollution*, 146: 567-576.
- Wu, Y., Chen, J., Ji, J., Tian, Q., Wu, X., (2005a), "Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination", *Environmental Science and Technology*, 39 (3): 873-878.
- Wu, Y., Chen, J. Ji, J., Gong, P., Liao, Q., Tian, Q., Ma, H., (2007), "A Mechanism study of reflectance spectroscopy for investigating heavy metals in soil", *Soil Science Society of America Journal*, 17: 567-576.
- Wu, Y., Chen, J., Wu, X., Tian, Q., J I, J., Qin, Z., (2005b), "Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils", *Applied Geochemistry*, 20 (6): 1051-1059.

- Yaolin, L., Wei, L., Guofeng, W., Xinguo, X., (2011), "Feasibility of estimating heavy metal contaminations in floodplain soils using laboratory-based hyperspectral data-a case study along Le'an River, China", *Geo-spatial Information Science*, 14(1): 10-16.
- Zhang, Z., Wen, J., Zhao, D., (2010), "Band selection method for retrieving soil lead content with hyperspectral remote sensing data", *The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 7831: 1465-1472.