

پهنه‌بندی آلودگی فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه ذرات خاک براساس داده‌های ماهواره Landsat ETM+ در جنوب شهر اصفهان

شهناز محمودی، مهدی نادری* و جهانگرد محمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

این تحقیق با هدف تعیین پراکنش مکانی غلظت فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک با استفاده از انعکاس ثبت شده از ماهواره Landsat ETM+ در جنوب شهر اصفهان در نزدیکی معدن باما صورت گرفت. برای تحقق این هدف، ۱۰۰ نمونه مرکب خاک سطحی به‌طور تصادفی از منطقه مورد نظر جمع‌آوری شد. نمونه‌ها هوا خشک شده و کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک ۵۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۱۲۵، ۱۲۵-۷۵، ۷۵-۵۰ و ۵۰ < میکرون بعد از پراکنده کردن کل خاک با استفاده از دستگاه التراسونیک و الک‌های مناسب تعیین شدند. غلظت‌های کل روی، سرب و کادمیوم پس از هضم مرطوب نمونه‌ها با اسید نیتریک با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد بین میزان انعکاس‌های طیفی خاک در باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و پانکروماتیک ماهواره Landsat ETM+ و غلظت‌های فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک هم‌بستگی معنی‌دار منفی وجود دارد. مدل‌های رگرسیون چند متغیره گام به گام جهت بررسی امکان تخمین غلظت‌های فلزات سنگین در کلاس‌های ذرات خاک به کمک داده‌های باندهای ماهواره‌ای تشکیل شدند و پراکنش مکانی فلزات سنگین به کمک معادلات رگرسیون چندگانه گام به گام پهنه‌بندی گردید. نتایج نشان داد غلظت فلزات سنگین در همه کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در نزدیکی معادن حداکثر است و با افزایش فاصله کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، انعکاس، فلزات سنگین، Landsat ETM+

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khnaderi@yahoo.com

مقدمه

فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی به شمار می‌روند که از طرق مختلف مانند کاربرد لجن فاضلاب، کودهای شیمیایی، فرونشست مواد معلق حاصل از کارخانجات و معادن بر روی زمین‌های اطراف، فاضلاب شهری و دفن مواد زائد جامد در مناطق نامناسب، منابع آب و خاک را آلوده می‌نمایند (۹). حضور آلوده‌کننده‌ها در خاک نسبت به سایر قسمت‌های بیوسفر طولانی‌تر بوده و به نظر می‌رسد آلودگی خاک خصوصاً به وسیله فلزات سنگین، دائمی باشد. فعالیت‌های معدن‌کاوی به‌عنوان منبع اولیه فلزات سنگین بوده و تأثیر زیادی بر محیط اطراف خود دارند به طوری که در برخی از مناطق موجب افزایش چند برابری آلودگی ذرات خاک و افزایش در معرض قرارگیری انسان‌ها به مواد خطرناک شده‌اند (۱۴). اندازه ذرات خاک نقش مهمی در تراکم فلزات سنگین دارند و ذرات ریز خاک اغلب غلظت‌های زیادتری از فلزات سنگین را نشان می‌دهند (۷).

برخی از فلزات به‌صورت ترجیحی جذب ذرات ریز می‌شوند و ذرات ریز حاوی فلزات سنگین، تهدید جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شوند (۱۱). ذرات ریز مکان‌های ویژه زیادی دارند که قادر به نگه‌داری مقادیر زیادی از فلزات سنگین هستند (۱۸). اطلاع از توزیع فلزات در جزءهای مختلف اندازه ذرات در ارزیابی واقع‌گرایانه آلودگی فلزات سنگین مرتبط با سلامتی انسان ضروری است (۳). ذرات ریز به‌دلیل سطح ویژه بیشتر نسبت به ذرات درشت‌تر به‌راحتی از مخاط معده عبور کرده و جذب می‌شوند (۱۱). عناصر سنگینی چون روی، سرب و کادمیوم به‌دلیل توانایی بالقوه در آسیب رسانی به سلامت انسان‌ها در چند دهه اخیر از نظر مسائل زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و سعی شده از ورود آنها به چرخه محیط زیست تا حد امکان جلوگیری شود. هرنرگن و همکاران (۸) در مطالعه‌ای بر روی رسوبات جاده‌ای غلظت فلزات Fe, Zn, Pb, Cd, Cu, Cr و Mn را در پنج کلاس اندازه‌ای شامل >300 ، ۱۵۱-۳۰۰، ۱۵۰-۱۵۰

۷۶، ۴۵-۷۵ و $0/45$ میکرون اندازه‌گیری کردند و بیان نمودند که بالاترین غلظت فلزات سنگین در کلاس اندازه‌ای ۴۵-۷۵ میکرون و یا به‌طور کلی رسوبات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون جذب شده‌اند. آکاستا و همکاران (۳) نیز به این نتیجه رسیدند که با کاهش اندازه ذرات خاک مقادیر فلزات سنگین افزایش می‌یابد و فلزات سنگین به‌طور ذاتی در ذرات خاک با اندازه کمتر از ۱۵۰ میکرون تجمع می‌یابند. صلحی و همکاران (۱۵) قابلیت استفاده از گیاهان مختلف برای اصلاح خاک‌های آلوده به روی و سرب را در نزدیکی معدن باما در اصفهان مورد بررسی قرار دادند و هم‌بستگی خطی و مثبتی بین غلظت فلزات در اندام‌های گیاهی با غلظت عصاره‌گیری شده با DTPA در خاک گزارش کردند و بیان نمودند که گیاه آفتابگردان در مقایسه با کانولا توانایی بیشتری برای جذب روی و سرب در خاک‌های آلوده به این عناصر دارد.

امینی و همکاران (۴) بیان نمودند که فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری به‌طور معنی‌داری غلظت کل کادمیوم را در خاک تحت تأثیر قرار می‌دهند و در بین خصوصیات خاک، شوری خاک بیشترین تأثیر را در غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده با DTPA دارد. در اندازه‌گیری عناصر سنگین در سطوح وسیع باید از روش‌های استفاده کرد که ضمن سادگی از دقت، سرعت بالا و هزینه کمتری برخوردار باشند. در این روش‌ها حداقل تعداد نمونه برای تعیین پراکنش عناصر سنگین به‌کار گرفته می‌شود (۲۰). با رشد و توسعه فناوری‌های فضایی و فرستادن سکوهایی مانند ماهواره‌های سری Landsat و SPOT به فضا فصل جدیدی از علم سنجش از دور گشوده و استفاده از تصاویر و اطلاعات ماهواره‌ای متداول شد. خصوصیات بازتابی خاک با مقدار خاک بدون پوشش، ساختمان خاک، توزیع اندازه ذرات، میزان فلزات سنگین، ترکیبات مختلف شیمیایی و رسوبات بر جای مانده بر سطح خاک تغییر می‌کند (۱۳). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در تعیین خصوصیات خاک و پراکنش آلودگی روشی است سریع و کم هزینه که در سال‌های اخیر توجه تعداد زیادی را به خود جلب کرده است

قسمت‌های جنوبی منطقه، معدن دولتی باما و چند معدن خصوصی دیگر وجود دارد که غنی از رگه‌های روی و سرب می‌باشند. کاربری اراضی استخراج و تغلیظ سرب و روی می‌باشد و جز در قسمت شرق منطقه کاربری کشاورزی وجود ندارد. موقعیت ۱۰۰ نقطه نمونه‌برداری به صورت تصادفی روی تصویر ترکیب رنگی مجازی استاندارد (Standard False Color Composite) تعیین و سپس موقعیت نمونه‌ها با دستگاه سامانه موقعیت جهانی (Global Positioning System, GPS) در منطقه شناسایی شد. با توجه به این‌که آلودگی ناشی از فعالیت‌های معدنی عمدتاً در سطح خاک قرار گرفته و فرسایش بادی و آبی بیشتر خاک سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد اقدام به نمونه‌برداری مرکب از خاک سطحی در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری شد. به این صورت که از هر نقطه مشخص شده به فاصله ۳۰ متری تعداد سه نمونه دیگر برداشته شد، به طوری که سه نمونه مزبور در سه رأس یک مثلث قرار گرفت.

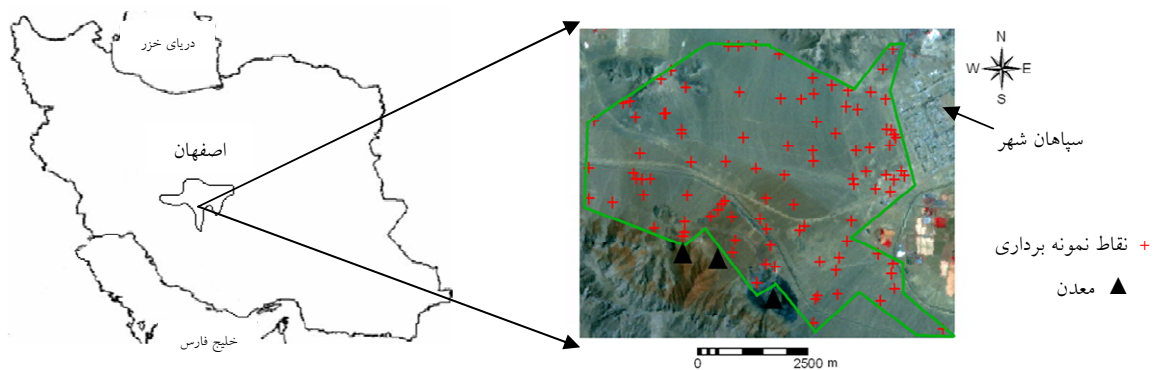
سپس ۴ نمونه خاک با هم مخلوط و در نهایت یک نمونه کلی از آن به دست آمد. نمونه‌ها در آزمایشگاه هوا خشک، با چکش پلاستیکی خرد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. جهت تسهیل جداسازی ذرات خاک براساس قطر در پنج کلاس اندازه‌ای ۵۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۱۲۵، ۱۲۵-۷۵، ۷۵-۵۰ و ۵۰ < میکرون، نمونه‌های کل خاک (ذرات کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر) به مدت یک ساعت با دستگاه شیکر تکان داده شده و سپس با دستگاه تراسونیک (Ultrasonic) مدل UP200H پراکنده شدند و در نهایت به وسیله الک جداسازی ذرات با اندازه‌های مورد نظر صورت گرفت. جهت تعیین غلظت کل عناصر سنگین در خاک روش هضم اسیدی به کار رفت (۱۶). به طوری که به یک گرم خاک از هر کلاس اندازه‌ای، ۷/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ مولار اضافه شد، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حمام آب گرم قرار گرفتند و بعد با استفاده از کاغذ صافی عصاره‌گیری شدند و غلظت کل سرب، روی و کادمیوم با دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی مدل پرکین المر (Atomic Absorption Spectrophotometer- Perkin Elmer) تعیین شدند.

(۲۰). چوئی و همکاران (۵) پتانسیل استفاده از پارامترهای جذب طیفی در دامنه ۲۴۰۰-۴۰۰ نانومتر را برای پیش‌بینی فلزات سنگین و پهنه‌بندی پراکنش مکانی آنها بررسی کردند و اظهار داشتند انعکاس طیفی دامنه‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک (۲۴۰۰-۴۰۰ نانومتر) به عنوان روشی سریع و ارزان در آنالیزهای کمی و توصیفی بسیاری از ترکیبات مورد توجه است. ویلامز و مالی (۱۹) در مطالعه‌ای به منظور پیش‌بینی غلظت فلزات سنگین در رسوبات دریاچه آب شیرین در شمال غرب کانادا از روش انعکاس طیفی مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق تجزیه شیمیایی و مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله طیف‌سنجی در محدوده مادون قرمز برای عناصر Fe ، Cd ، Cu ، Zn ، Pb ، Mn و Fe به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۹۱، ۰/۹۳، ۰/۸۱، ۰/۸۸، ۰/۹۳ و ۰/۸۶ بود. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه طیف‌سنجی و تخمین غلظت عناصر سنگین در خاک با استفاده از رادیومترهای زمینی می‌باشد. با توجه به اهمیت توزیع فلزات در جزءهای مختلف اندازه ذرات خاک در ارزیابی آلودگی مرتبط با سلامتی انسان، اهداف این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) اندازه‌گیری غلظت کل فلزات سنگین روی، سرب و کادمیوم در کلاس‌های مختلف اندازه ذرات معدنی خاک. (۲) در صورتی که غلظت‌های اندازه‌گیری شده هم‌بستگی قابل قبولی با میزان انعکاس خاک‌ها در باندهای مختلف سنجنده Landsat ETM+ داشته باشد تلاش خواهد شد که از مدل‌های رگرسیونی برای تخمین عناصر در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک با استفاده از انعکاس نمونه‌های خاک در باندهای سنجنده استفاده شود. (۳) پهنه‌بندی غلظت عناصر سنگین ذکر شده در کلاس‌های اندازه ذرات خاک.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۹۰۰۰ هکتار در جنوب شهر اصفهان و در حومه سپاهان شهر واقع شده و متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۶۵۰ متر است (شکل ۱). در



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و الگوی نمونه برداری بر روی تصویر ماهواره‌ای

ترتیب میزان انعکاس باندهای مختلف ماهواره Landsat ETM+ برای تمام نقاط نمونه برداری استخراج گردید. آمار توصیفی آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های خاک تهیه گردید و رابطه هم‌بستگی بین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌ها با میزان انعکاس نقاط مانند روی باندها بررسی شد. مدل‌های رگرسیون چند متغیره گام به گام جهت برآورد عناصر سنگین با استفاده از انعکاس باندهای ماهواره‌ای به کار رفتند. با استفاده از این مدل‌ها اقدام به برآورد مقادیر عددی غلظت هر یک از آلاینده‌ها شد. لازم به ذکر است که به صورت تصادفی از ۸۰ درصد داده‌ها برای برازش مدل‌ها و ۲۰ درصد داده‌ها نیز برای صحت‌سنجی مدل‌های برازش شده استفاده شد. آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار Statistica (۱۷) انجام شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج مقایسه میانگین اثر کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک بر غلظت روی، سرب و کادمیوم را نشان می‌دهد. میانگین غلظت روی از ۲۲۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کلاس اندازه‌ای ۵۰۰-۲۵۰ میکرون تا ۴۰۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۵۰ میکرون متغیر است. میانگین غلظت سرب بین ۸۷/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کلاس اندازه‌ای ۵۰۰-۲۵۰ میکرون و ۱۳۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۵۰ میکرون می‌باشد و میانگین غلظت

فرآوری تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره‌ای مربوط به Landsat ETM+ که شامل اطلاعات رقومی ۹ باند سنجنده ETM+ که در تاریخ ۹ اگوست سال ۲۰۰۲ میلادی برداشت شده‌اند مورد استفاده قرار گرفتند. تصحیح هندسی تصاویر به کمک داده‌های استخراج شده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه و اطلاعات میدانی برداشت شده به کمک GPS صورت گرفت. کلیه عملیات پردازش تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ایلویس (ILWIS 3.4) انجام شد. تصاویر اصلاح شده براساس مدل ارائه شده توسط مارخام و باکر (۱۲) به گونه‌ی زیر به تشعشع (Radiance) تبدیل شدند.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{\text{cal max}} - Q_{\text{cal min}}} \right) \cdot (Q_{\text{cal max}} - Q_{\text{cal min}}) + L_{\min \lambda} \quad [1]$$

در معادله فوق L_{λ} ، $L_{\min \lambda}$ ، $L_{\max \lambda}$ و $Q_{\text{cal min}}$ و $Q_{\text{cal max}}$ به ترتیب معرف حداکثر و حداقل تشعشع رسیده به حسگر، میزان تشعشع ثبت شده در حسگر ($\text{watt} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)، حداکثر و حداقل مقدار کمی شده برای پیکسل می‌باشند.

نهایتاً تشعشع ثبت شده براساس معادله زیر به انعکاس تبدیل گردید.

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{\text{sun} \lambda} \cdot \cos \theta} \quad [2]$$

در این معادله ρ_p ، d ، θ و $E_{\text{sun} \lambda}$ به ترتیب معرف انعکاس، فاصله زمین تا خورشید (واحد نجومی)، زاویه زنیط خورشید (درجه) و میزان تشعشع خورشیدی در خارج از اتمسفر می‌باشند. بدین

جدول ۱. نتایج مقایسه میانگین اثر کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک (میکرون) بر غلظت روی، سرب و کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

متغیر	کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک				
	<۵۰	۵۰-۷۵	۷۵-۱۲۵	۱۲۵-۲۵۰	۲۵۰-۵۰۰
روی	۴۰۰/۹ ^A	۲۹۰/۰ ^B	۲۳۱/۴ ^B	۲۲۹/۶ ^B	۲۲۳/۷ ^B
سرب	۱۳۶/۳ ^A	۱۰۲/۲ ^B	۹۴/۶ ^B	۹۳/۷ ^B	۸۷/۴ ^B
کادمیوم	۳/۲ ^A	۲/۸ ^A	۲/۷ ^A	۳/۱ ^A	۳/۱ ^A

میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون *LSD* فیشر دارای اختلاف معنی‌دار نیستند

کادمیوم در همه کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک و انعکاس باندهای ۱، ۲ و ۸ هم‌بستگی منفی معنی‌دار وجود دارد. هم‌چنین غلظت کادمیوم در کلاس‌های اندازه‌ای ۲۰۰-، ۷۵-۱۲۵، ۵۰-۷۵ و <۵۰ میکرون با انعکاس باندهای ۳ نیز هم‌بستگی منفی معنی‌دار دارد. بررسی روند تغییرات هم‌بستگی نشان می‌دهد که قوی‌ترین رابطه بین غلظت روی و سرب با انعکاس، در محدوده نور مرئی و مادون قرمز نزدیک و بین غلظت کادمیوم در محدوده نور مرئی از طیف الکترومغناطیس وجود دارد. دیانی و همکاران (۱) هم‌بستگی منفی و معنی‌داری را بین غلظت سرب، روی و کادمیوم در خاک با ارزش رقومی باندهای سنجنده ETM+ گزارش کردند و بیان نمودند با افزایش طول موج از مادون قرمز نزدیک به بعد هم‌بستگی معنی‌داری بین غلظت عناصر سنگین و بازتاب باندها مشاهده نمی‌شود. کمپر و سومر (۱۰) گزارش کردند که عناصر سرب، آهن، جیوه و گوگرد هم‌بستگی منفی و معنی‌داری با اطلاعات باندهای مادون قرمز نزدیک دارند. این محققین گزارش کردند که عناصر سنگین در خاک باعث جذب طول موج مادون قرمز نزدیک می‌شوند.

ویلیامز و مالی (۱۹) برای بررسی مقادیر فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ای در شمال غرب کانادا از روش‌های انعکاس اسپکتروفتومتری نور مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند و گزارش کردند که غلظت عناصر روی، سرب، کادمیوم، نیکل، منگنز و آهن هم‌بستگی منفی و معنی‌داری با اطلاعات باندهای سبز، آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک دارند. یانزاهو و همکاران (۲۰)

کادمیوم بین کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک اختلاف اندکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با کاهش اندازه ذرات خاک غلظت کل روی، سرب و کادمیوم در خاک افزایش یافته است به طوری که کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۵۰ میکرون دارای بالاترین میانگین غلظت است. براساس نظر کاباتا-پندیاس (۹) حد بحرانی سمیت غلظت کل روی، سرب و کادمیوم در خاک به ترتیب ۳۰۰، ۴۰۰ و ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۵۰ میکرون میانگین غلظت روی و کادمیوم بالاتر از حد بحرانی آنها در خاک است و غلظت سرب کمتر از حد بحرانی آن می‌باشد.

در این رابطه وانگ و همکاران (۱۸) در مطالعه فلزات سنگین در جزء‌های اندازه‌ای ذرات خاک، بالاترین غلظت فلزات سنگین را در جزء کوچک‌تر از ۴۵ میکرون گزارش کردند و اظهار داشتند که ذرات ریزتر از ۱۲۵ میکرون به سهولت به وسیله باد به اتمسفر انتقال پیدا می‌کنند و سبب توزیع آلودگی فلزات سنگین می‌شوند. هرنگرن و همکاران (۸) گزارش کردند که رسوبات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون بیشترین مقدار فلزات سنگین را جذب کرده‌اند.

ضرایب هم‌بستگی بین غلظت فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک و انعکاس به‌دست آمده از تصاویر ماهواره Landsat ETM+ در جدول ۲ نشان داده شده است. بین غلظت روی و سرب در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک و میزان انعکاس باندهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۸ هم‌بستگی منفی وجود دارد که در سطح احتمال ۹۵٪ معنی‌دار هستند. بین غلظت

جدول ۲. همبستگی بین غلظت عناصر سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک (میکرون) با میزان

انعکاس در باندهای ماهواره Landsat ETM+

متغیر	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶.۱	باند ۶.۲	باند ۷	باند ۸
Zn<2000	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲*	-۰/۴*
Zn ₂₅₀₋₅₀₀	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Zn ₁₂₅₋₂₅₀	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Zn ₇₅₋₁₂₅	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	-۰/۰ n.s	۰/۰ n.s	-۰/۰ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Zn ₅₀₋₇₅	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۵*	-۰/۳*	۰/۰ n.s	-۰/۱ n.s	-۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Zn<50	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۵*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	-۰/۰ n.s	-۰/۰ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Pb<2000	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۳*	-۰/۴*
Pb ₂₅₀₋₅₀₀	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۳*	-۰/۴*
Pb ₁₂₅₋₂₅₀	-۰/۷*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲*	-۰/۴*
Pb ₇₅₋₁₂₅	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲*	-۰/۴*
Pb ₅₀₋₇₅	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲*	-۰/۴*
Pb<50	-۰/۸*	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۳*	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۴*
Cd<2000	-۰/۷*	-۰/۶*	-۰/۵*	-۰/۲ n.s	۰/۲ n.s	۰/۰ n.s	-۰/۰ n.s	۰/۳*	-۰/۴*
Cd ₂₅₀₋₅₀₀	-۰/۳*	-۰/۲*	-۰/۲ n.s	-۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	۰/۱ n.s	۰/۲ n.s	-۰/۲*
Cd ₁₂₅₋₂₅₀	-۰/۳*	-۰/۳*	-۰/۲ n.s	-۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	-۰/۳*
Cd ₇₅₋₁₂₅	-۰/۵*	-۰/۴*	-۰/۴*	-۰/۲ n.s	-۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	-۰/۴*
Cd ₅₀₋₇₅	-۰/۵*	-۰/۴*	-۰/۴*	-۰/۲*	-۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	-۰/۴*
Cd<50	-۰/۴*	-۰/۴*	-۰/۳*	-۰/۲ n.s	-۰/۰ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	۰/۱ n.s	-۰/۳*

n.s و * : معرف غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ($P < 0/05$)

اندازه‌ای ذرات خاک در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تخمین روی انعکاس باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک در معادله قرار گرفته‌اند. به کمک مدل‌های رگرسیون چند متغیره جدول ۳ پراکنش مکانی غلظت روی در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک تهیه شدند (شکل ۲). شکل ۲ نشان می‌دهد که در اطراف معادن آلودگی حداکثر و با افزایش فاصله از معادن آلودگی کاهش می‌یابد.

بر اساس گزارش کاباتا- پندیاس (۹) غلظت طبیعی روی در اکثر خاک‌ها ۱۷-۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد بحرانی آن ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. بررسی نقشه‌ها نشان می‌دهد که در اراضی نزدیک شهر، غلظت روی در کلاس‌های اندازه‌ای

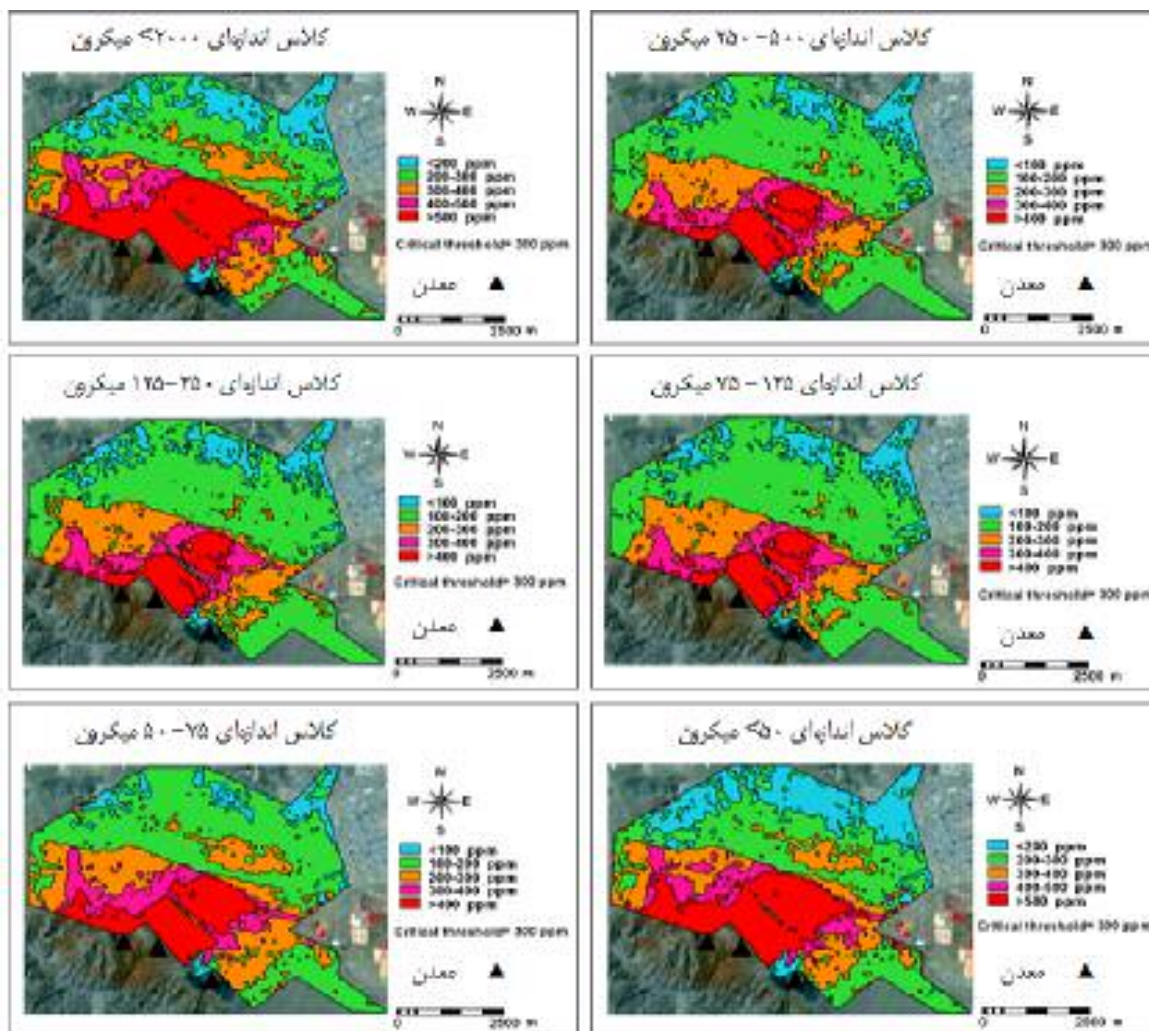
در بررسی عناصر سنگین با استفاده از انعکاس طیفی در چین، همبستگی منفی و معنی‌داری را بین باندهای آبی، سبز و قرمز از طیف نور مرئی و باند مادون قرمز نزدیک با عناصر روی، سرب و کادمیوم گزارش کردند. محققین مختلف بیان نمودند که مقادیر فلزات سنگین در خاک باعث کاهش بازتاب در طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌شوند (۶، ۱۰ و ۱۹).

با توجه به جدول ۲ امکان تخمین غلظت روی، سرب و کادمیوم در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک به کمک باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک وجود دارد. مدل‌های رگرسیون چند متغیره برآورد شده برای تخمین غلظت روی در کلاس‌های

جدول ۳. مدل‌های رگرسیون چند متغیره برای تخمین غلظت روی در کلاس‌های اندازه‌های ذرات خاک (میکرون)

مدل	MSE	F	R ²
$Zn_{<2000} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 476/0.02 - 12743/0.38 (\text{باند } 2) + 7489/14 (\text{باند } 4)$	1386050	89**	0/7
$Zn_{250-500} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 383/246 - 8085/0.06 (\text{باند } 2) + 4364/643 (\text{باند } 4)$	584447	55**	0/6
$Zn_{125-250} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 297/773 - 7933/0.69 (\text{باند } 2) + 4593/227 (\text{باند } 4)$	541540	54**	0/6
$Zn_{75-125} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 374/635 - 7740/424 (\text{باند } 2) + 4168/236 (\text{باند } 4)$	536422	53**	0/6
$Zn_{50-75} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 392/793 - 9287/815 (\text{باند } 2) + 5191/206 (\text{باند } 4)$	756728	42**	0/5
$Zn_{<50} \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil} = 430/151 - 13096/255 (\text{باند } 2) + 7838/985 (\text{باند } 4)$	1449576	49**	0/6

(P<0/01) : **



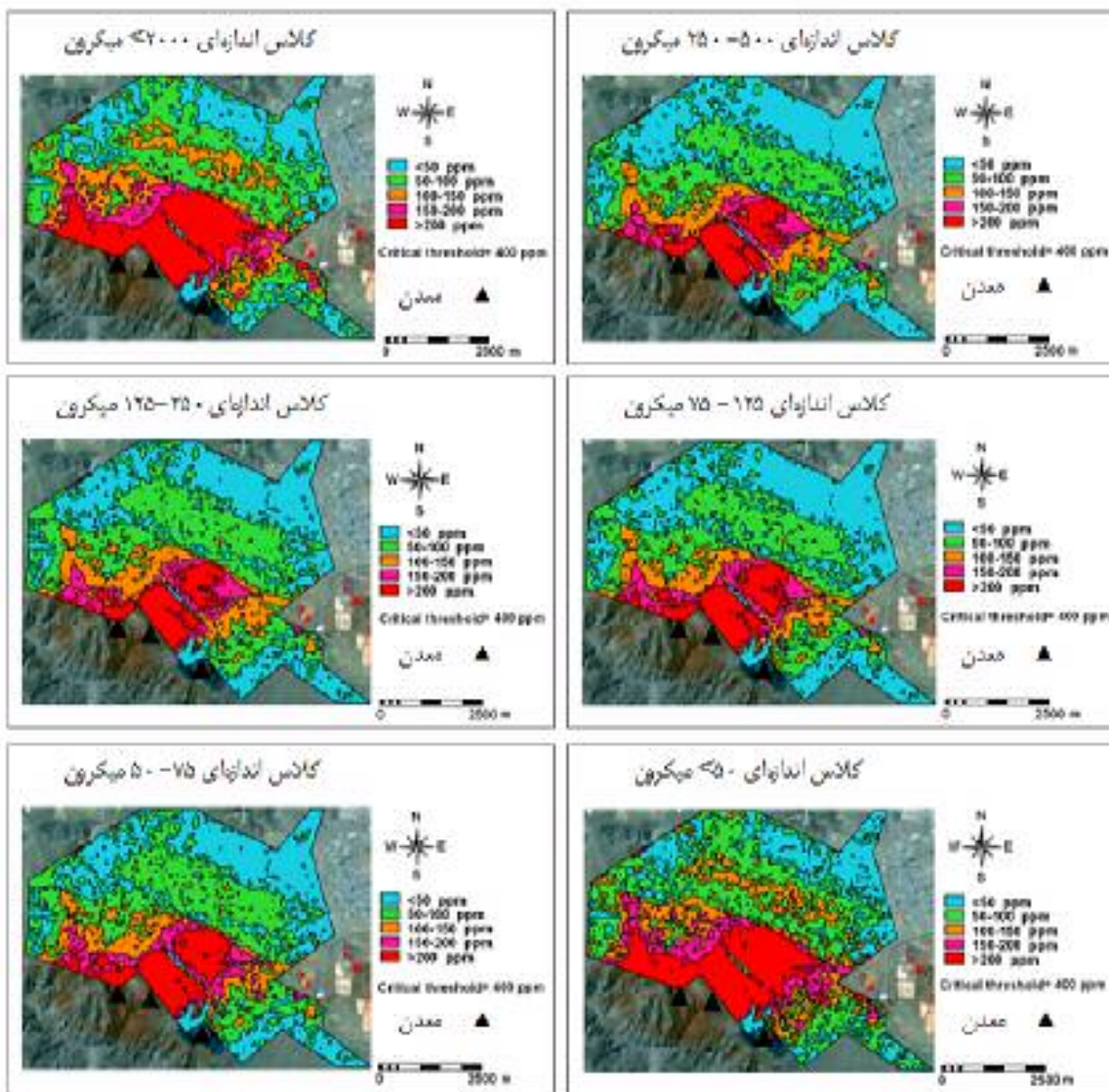
شکل ۲. برآورد غلظت روی در کلاس‌های اندازه‌های ذرات خاک در منطقه

شده است. در این مدل انعکاس باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک وارد شده‌اند. با استفاده از این مدل نقشه پراکنش غلظت کادمیوم تهیه شد (شکل ۴). در نزدیکی معادن حداکثر آلودگی کادمیوم وجود دارد و با افزایش فاصله آلودگی خاک ناشی از کادمیوم کاهش می‌یابد. غلظت کادمیوم در اکثر خاک‌ها ۱-۲ < و حد بحرانی آن ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۹). در محدوده شهر غلظت کادمیوم در محدوده ۲/۵ تا ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که بالاتر از دامنه طبیعی آن و کمتر از حد بحرانی آن در خاک است. با توجه به گسترش آلودگی به سمت شهر و توسعه شهر به سمت غرب و جنوب غرب احتمال این‌که در آینده نزدیک در نواحی شهری غلظت کادمیوم به میزان بالاتر از حد بحرانی برسد وجود دارد. فارسی‌پور و همکاران (۲) در مطالعه‌ای روند تغییرات غلظت کل قلع را در خاک‌های اطراف مجتمع مس سرچشمه کرمان در سه جهت رفسنجان، شهرک مس و معدن بررسی کردند و دریافتند که غلظت کل آن از غلظت کل بحرانی در خاک (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر بود ولی به دلیل غالب بودن باد در جهت رفسنجان، تجمع قلع در این سمت بیشتر از دو سمت دیگر بود. تجزیه‌های آماری و مدل‌های رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهند که باندهای مرئی سبز و مادون قرمز نزدیک (NIR) برای بررسی میزان روی و کادمیوم و باندهای آبی و مادون قرمز نزدیک برای تخمین سرب بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند. نتایج حاصل با گزارش‌هایی که از مطالعات و تحقیقات در این زمینه منتشر شده است نیز مطابقت دارد. در این زمینه ویلیامز و مالی (۱۹) از روش‌های رگرسیونی حداقل مربعات جزئی و اطلاعات باندهای سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک برای بررسی پراکنش روی و از اطلاعات باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک برای بررسی پراکنش کادمیوم در کانادا استفاده کردند. کمپر و سومر (۱۰) در مدل‌های رگرسیونی چند متغیره گام به گام از اطلاعات باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک برای تخمین سرب، از اطلاعات باندهای قرمز، سبز و مادون قرمز نزدیک برای تخمین روی و کادمیوم در اسپانیا استفاده کردند.

۵۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۱۲۵ و ۷۵-۵۰ میکرون ۱۰۰ < تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که بیشتر از دامنه غلظت طبیعی و کمتر از حد بحرانی آن در خاک است. در این اراضی غلظت روی در کلاس‌های اندازه‌ای ۲۰۰۰ < و ۵۰ < میکرون خاک در محدوده ۲۰۰ < تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد که نزدیک به حد بحرانی آن عنصر در خاک است. غلظت روی در همه کلاس‌های اندازه‌ای خاک در اطراف معادن بیشتر از حد بحرانی آن در خاک است. با توجه به گسترش آلودگی به سمت شهر به‌ویژه در مورد کلاس‌های اندازه‌ای ۲۰۰۰ < و ۵۰ < میکرون خاک و پیشرفت شهر به سمت غرب و جنوب غرب منطقه احتمال این‌که در آینده نزدیک غلظت روی در محدوده شهر به بیش از حد بحرانی آن در خاک برسد زیاد است که این مسأله می‌تواند سلامت افرادی که در منطقه زندگی می‌کنند را تهدید کند.

مدل‌های برآورد شده برای تخمین غلظت سرب در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد برای تخمین سرب در همه کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک انعکاس باندهای آبی و مادون قرمز نزدیک وارد مدل شده‌اند. با استفاده از مدل‌های جدول ۴ نقشه‌های پراکنش غلظت سرب در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در منطقه تهیه شد (شکل ۳). نقشه‌های مذکور نشان می‌دهند که در اطراف معادن آلودگی حداکثر و با افزایش فاصله از معادن میزان آلودگی کاهش می‌یابد. دامنه طبیعی غلظت سرب در خاک‌ها ۱۰-۱۰۰ و حد بحرانی آن ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۹). در اراضی نزدیک شهر و مساحت زیادی از منطقه مورد مطالعه، غلظت سرب در همه کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در محدوده ۵۰ < تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد که در دامنه غلظت طبیعی و کمتر از حد بحرانی آن در خاک است. بنابراین در کل منطقه مورد مطالعه، غلظت سرب در همه کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک کمتر از حد بحرانی آن در خاک است.

مدل رگرسیون چند متغیره برای تخمین غلظت کادمیوم در کلاس اندازه‌ای ۲۰۰۰ < میکرون خاک در جدول ۵ نشان داده



شکل ۳. برآورد غلظت سرب در کلاس‌های اندازه‌های ذرات خاک در منطقه

جدول ۴. مدل‌های رگرسیون چند متغیره برای تخمین غلظت سرب در کلاس‌های اندازه‌های ذرات خاک (میکرون)

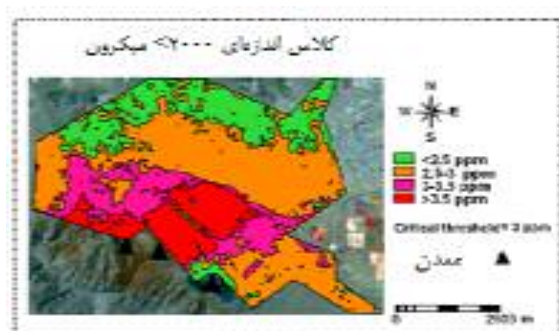
مدل	MSE	F	R ²
$\text{Pb}_{<2000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 337/317 - 8335/755 (\text{باند ۱}) + 2062/575 (\text{باند ۴})$	341549	88**	0/7
$\text{Pb}_{250-500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 257/886 - 6056/745 (\text{باند ۱}) + 1425/395 (\text{باند ۴})$	182668	70**	0/7
$\text{Pb}_{125-250 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 246/346 - 5893/79 (\text{باند ۱}) + 1427/668 (\text{باند ۴})$	171688	59**	0/6
$\text{Pb}_{75-125 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 309/251 - 6173/043 (\text{باند ۱}) + 1286/949 (\text{باند ۴})$	195681	74**	0/7
$\text{Pb}_{50-75 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 317/074 - 6667/487 (\text{باند ۱}) + 1449/304 (\text{باند ۴})$	225903	65**	0/6
$\text{Pb}_{<50 \text{ mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 419/289 - 8483/061 (\text{باند ۱}) + 1803/931 (\text{باند ۴})$	367708	67**	0/6

($P < 0/01$)**

جدول ۵. مدل رگرسیون چند متغیره برای تخمین غلظت کادمیوم در کلاس اندازه‌های کوچک‌تر از ۲۰۰۰ میکرون

مدل	MSE	F	R ²
Cd < 2000 mg kg ⁻¹ soil = ۱/۹۹ - ۳۶/۶۲۸ (باند ۲) + ۲۶/۴۰۲ (باند ۴)	۱۰	۶۶**	۰/۶

(P < ۰/۰۱)**



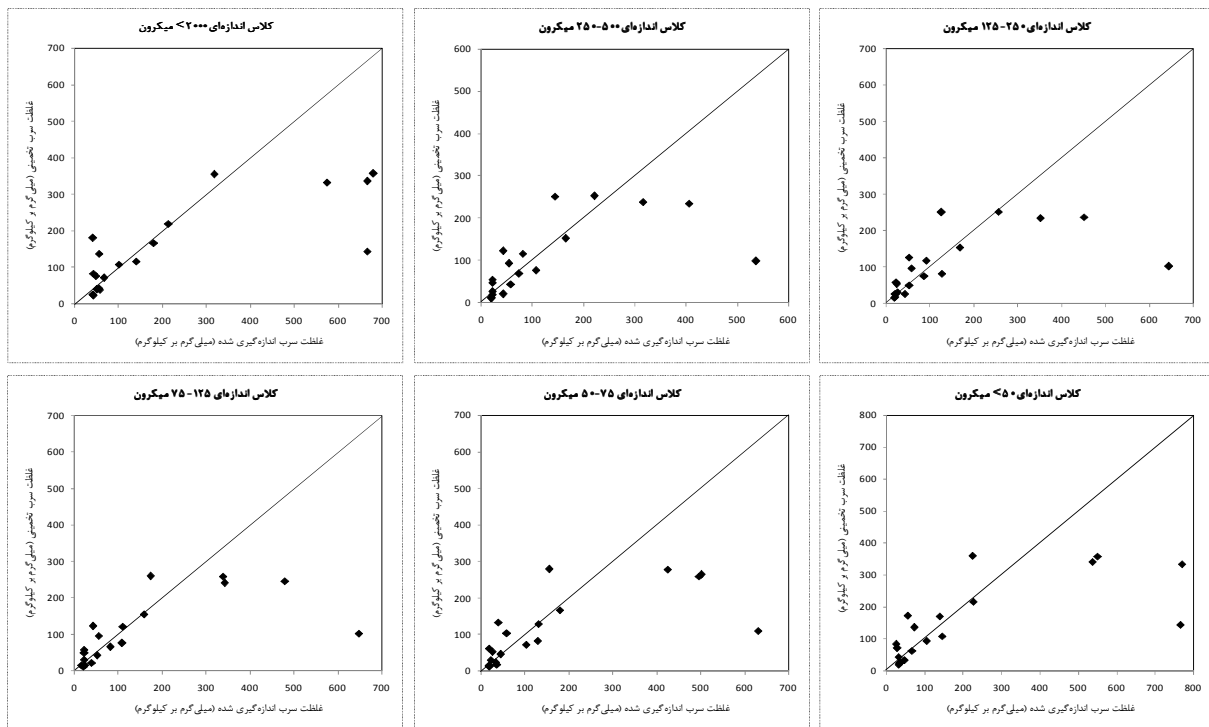
شکل ۴. برآورد غلظت کادمیوم در کلاس اندازه‌های < ۲۰۰۰ میکرون در منطقه

اندازه‌های ذرات خاک را نشان می‌دهند. در مورد صحت مدل‌هایی که برای برآورد روی در کلاس‌های اندازه‌های ۵۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۱۲۵، ۱۲۵-۷۵ و ۷۵-۵۰ میکرون به کار رفته‌اند شکل ۵ نشان می‌دهد که تقریباً برای غلظت‌های زیر ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در کلاس‌های اندازه‌های < ۲۰۰۰ و ۵۰ میکرون برای غلظت‌های کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم میزان روی اندازه‌گیری شده و برآورد شده نزدیک خط ۱:۱ قرار دارند که نشانه دقت بیشتر معادلات برای تخمین روی در غلظت‌های پایین است. شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل‌های به کار رفته برای برآورد سرب در کلاس‌های اندازه‌های ۵۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۱۲۵ و ۷۵-۵۰ میکرون، تقریباً برای غلظت‌های زیر ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم؛ در کلاس‌های اندازه‌های ۱۲۵-۲۵۰ و ۷۵-۵۰ میکرون، تقریباً در غلظت‌های کمتر از ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای کلاس اندازه‌های < ۲۰۰۰ میکرون در غلظت‌های کمتر از ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مناسب هستند. شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل به کار رفته برای برآورد کادمیوم، در غلظت‌های کمتر از ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم مناسب است. به‌طور کلی مقادیر برآورد شده

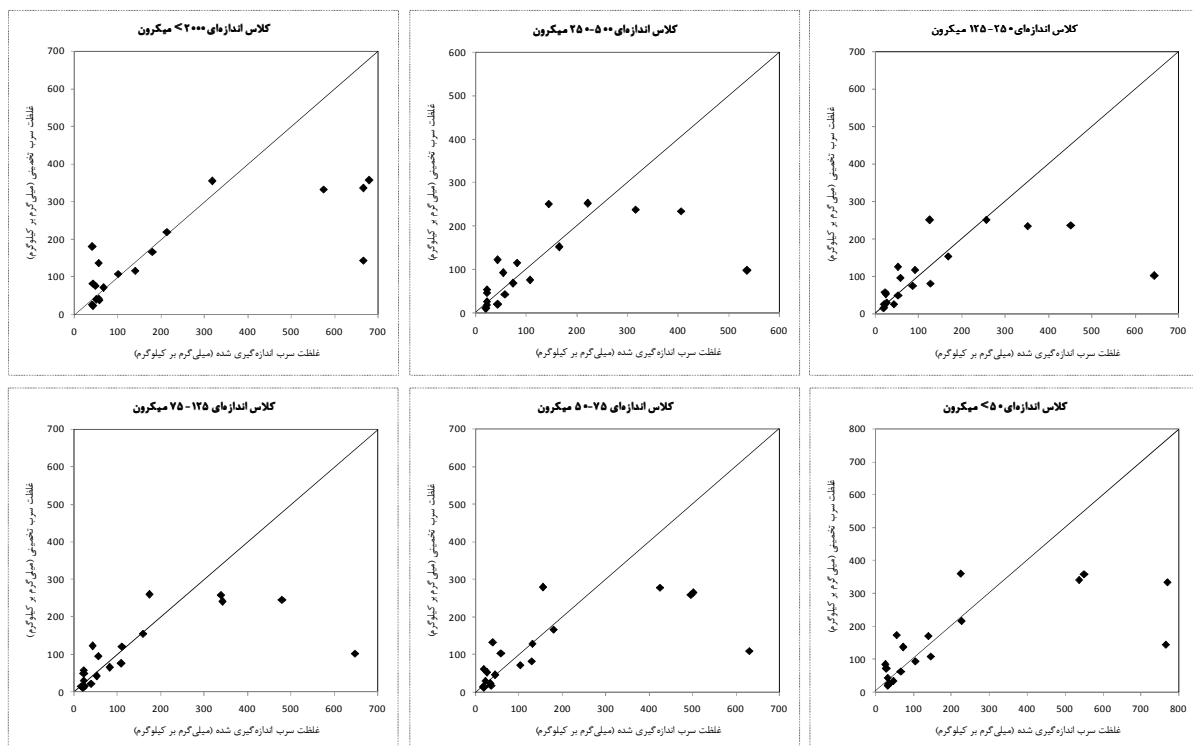
چوئی و همکاران (۶) از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره گام به گام برای بررسی پراکنش عناصر سنگین در اطراف معدن روداکویلاز اسپانیا استفاده کردند و از اطلاعات باندهای آبی و قرمز به‌عنوان متغیر مستقل در معادلات مربوط به تخمین غلظت سرب، و از اطلاعات باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک برای تخمین روی استفاده کردند.

ارزیابی دقت برآورد معادلات رگرسیون چند متغیره

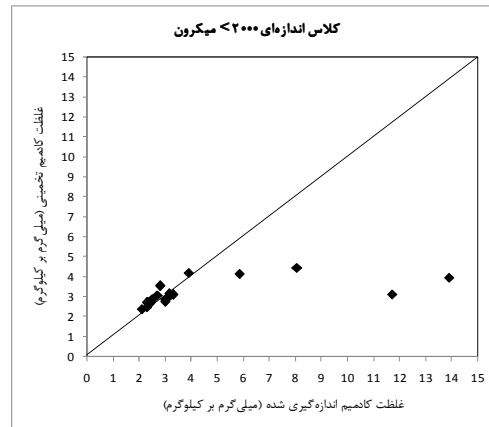
برای ارزیابی دقت معادلات رگرسیون چند متغیره به‌دست آمده، از غلظت عناصر اندازه‌گیری شده روی، سرب و کادمیوم مورد بررسی در ۲۰ نمونه خاک استفاده شد. غلظت‌های فلزات سنگین این ۲۰ نمونه برای برآورد معادلات رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفتند. پس از محاسبه مدل‌های رگرسیون چند متغیره، انعکاس‌های خاک در ۲۰ نقطه در باندهای اطلاعات ماهواره‌ای مربوطه مشخص شدند و برای تخمین غلظت عناصر در مدل‌های مربوطه قرار گرفته و مقادیر تخمینی به‌دست آمدند. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ رابطه بین غلظت فلزات اندازه‌گیری شده و تخمینی در کلاس‌های



شکل ۵. غلظت‌های روی اندازه‌گیری شده در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در مقابل مقادیر تخمینی آنها با استفاده از مدل‌های رگرسیونی



شکل ۶. غلظت‌های سرب اندازه‌گیری شده در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در مقابل مقادیر تخمینی آنها با استفاده از مدل‌های رگرسیونی



شکل ۷. غلظت‌های کادمیوم اندازه‌گیری شده در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۲۰۰۰ میکرون در مقابل مقادیر تخمینی آنها با استفاده از مدل رگرسیونی

سنگین می‌باشد. در مدل‌های به‌کار رفته از اطلاعات طیف نور مرئی و باند مادون قرمز نزدیک برای تخمین فلزات سنگین استفاده شد بنابراین توصیه می‌شود که در صورت امکان از اطلاعات ماهواره‌ای با دقت (Resolution) مکانی و طیفی بالاتر همراه با رادیومتر زمینی استفاده شود و اثرات سوء اتمسفر با مقایسه داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مرتفع گردد. با کاهش ذرات معدنی خاک غلظت عناصر سنگین افزایش می‌یابد و کوچک‌ترین ذرات خاک بالاترین غلظت فلزات سنگین را دارا هستند. لذا با توجه به فرسایش‌پذیری بالای ذرات ریز خاک به فرسایش بادی و این‌که به آسانی در هوا معلق می‌شوند تثبیت خاک که منبع اصلی آلودگی است و جلوگیری از انتشار و پراکندگی این ذرات با انجام عملیات حفاظت خاک در برابر فرسایش بادی و آبی ضروری می‌باشد.

روی، سرب و کادمیوم با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره، در غلظت‌های پایین تقریباً برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده این عناصر می‌باشند ولی با افزایش غلظت خطای تخمین افزایش می‌یابد و مقادیر برآورد شده توسط مدل‌ها کمتر از مقادیر واقعی هستند. ویلیامز و مالی (۱۹) و چوئی و همکاران (۶) نیز که به ترتیب در کشورهای کانادا و اسپانیا برای برآورد آلودگی عناصر سنگین از مدل‌های رگرسیونی و انعکاس باندها استفاده نمودند نتایج مشابهی را گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که قدرت تفکیک طیفی و مکانی باندهای ماهواره Landsat ETM+ برای مطالعات آلودگی خاک امکان‌پذیر است. مطالعه نقشه‌های به‌دست آمده نشانگر پتانسیل قابل توجه داده‌های ماهواره‌ای در تهیه نقشه‌های آلودگی عناصر

منابع مورد استفاده

۱. دیانی، م.، م. نادری و ج. محمدی. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی غلظت سرب، روی و کادمیوم در خاک با استفاده از داده‌های ماهواره Landsat ETM+ در جنوب شهرستان اصفهان، مجله آب و خاک ۲۴(۲): ۲۸۶-۲۹۶.
۲. فارسی‌پور، س.، غ. ثواقبی و ب. متشع زاده. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک بر غلظت کل و قابل جذب قلع در خاک‌های اطراف مجتمع مس سرچشمه کرمان، همایش ملی انرژی و محیط زیست کرمان.
3. Acosta, J. A., A. Faz Cano, J. M. Arocena, F. Debela and S. Martinez-Martinez. 2009. Distribution of metals in soil particle size fractions and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain). Geoderma 149: 101-109.

4. Amini, M., H. Khademi, M. Afyuni and K. C. Abbaspour. 2005. Variability of available Cadmium in relation to soil properties and landuse in an arid region in central Iran. *Water, Air and Soil Pollut.* 162: 205-218.
5. Choe, E., K. W. Kim, S. Bang, I. Yoon and K. Y. Lee. 2009. Qualitative analysis and mapping of heavy metals in an abandoned Au-Ag mine area using NIR Spectroscopy. *Environ. Geol.* 58: 477-482.
6. Choe, E., F. Meer, F. Ruitenbeek, H. Werff, B. Smeth and K. Kim. 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 Sens. Environ.* 112: 3222-3233.
7. Chunfa, W., W. Jiaping, L. Yongming, Z. Haibo and T. Ying. 2008. Statistical and geostatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. *Geoderma* 144: 171-179.
8. Herngren, L., A. Goonetilleke and G. A. Ayoko. 2006. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments. *Analytica Chimica Acta* 571: 270-278.
9. Kabata-pendias, A. and H. K. Pendias. 2000. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Pub. Press, United States.
10. Kemper, T. and S. Sommer. 2002. Estimate heavy metal contamination in soil after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environ. Sci. and Technol.* 36: 2742-2747.
11. Lin, Z. X., K. Harsbo, M. Ahlgren and U. Qvarfort. 1998. The source and fate of Pb in contaminated soils at the urban area of Falun in Central Sweden. *Sci. Total Environ.* 209: 47-58.
12. Markham, B. L. and J. L. Barker. 1987. Thematic mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. *Intl. J. Remote Sens.* 83: 517-523.
13. Metternicht, G. I. and J. A. Zinck. 1997. Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces. *Intl. J. Remote Sens.* 18: 2571-2586.
14. Rodriguez, J. A., N. Nanos, J. M. Grau, L. Gil and M. Lopez-Arias. 2008. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils. *Chemosphere* 70:1085-1096.
15. Solhi, M., H. shareatmadari and M. Hajabbasi. 2005. Lead and Zinc extraction potential of two common crop plants, *Helianthus Annuus* and *Brassica Napus*. *Water, Air and Soil Pollut.* 167: 59-71.
16. Sposito, G., L. J. Lund and A. C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid- zone field soils amended sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, Pb in solid phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 260-264.
17. StatSoft, Inc. STATISTICA, (data analysis software system), Version 6.0, 2001.
18. Wang, X., Y. Qin and Y. Chen. 2006. Heavy metals in urban roadside soils. Part 1. effect of particle size fractions on heavy metals partitioning. *Environ. Geol.* 50: 1061-1066.
19. Williams, P. C. and D. F. Malley. 1997. Use of Near-infrared reflectance spectroscopy in prediction of heavy metal in freshwater sediments by their association with organic matter. *Environ. Sci. and Technol.* 31: 3461-3467.
20. Yanzaho, W., C. Jun, W. Xinmin and T. Qingjiu. 2005. Possibilities of reflectance spectroscopy for assessment of contamination element in suburban soil. *Appl. Geochem.* 20: 1051-1059.

Mapping Heavy Metals Pollution in Soil Particle Size Classes Based on Landsat ETM+ Data in Southern Isfahan

SH. Mahmoudi, M. Naderi* and J. Mohammadi¹

(Received : Aug. 3-2011 ; Accepted : Jan. 31-2012)

Abstract

This research was carried out to determine spatial distribution of heavy metals concentration in soil particle size classes using Landsat ETM+ reflectance in Southern Isfahan city in the vicinity of Bama mine. To fulfill this goal, 100 compound soil surface samples were collected randomly from the area. The samples were air dried and soil particle size classes 250-500, 125-250, 75-125, 50-75 and <50 μm were determined using appropriate sieves after dispersion of the bulk samples of soil using ultrasonic apparatus. Total Zn, Pb and Cd concentrations were measured using Atomic Absorption Spectrophotometer after wet digestion of samples in acid nitric. The results indicated significant negative correlation coefficients between heavy metals concentrations of soil particle size classes and soil spectral reflectance in the visible, near infrared and panchromatic bands of Landsat ETM+ satellite. Stepwise multiple regression models were used for estimating heavy metals concentration in soil particle classes through satellite data. Furthermore, spatial distributions of heavy metals were mapped using stepwise multiple regression equations. Results also showed heavy metals concentrations in all soil particle size classes were maximum close to the mines and decreased by increasing the distance from these sources.

Keywords: Soil pollution, Reflectance, Heavy metals, Landsat ETM+.

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

*: Corresponding Author, Email: khnaderi@yahoo.com