

## پهنه‌بندی غلظت سرب، روی و کادمیم در خاک با استفاده از داده‌های

### ماهواره Landsat ETM+ در جنوب شهرستان اصفهان

محمود دیانی<sup>۱</sup> - مهدی نادری<sup>۲\*</sup> - جهانگرد محمدی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۴

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۱۱

#### چکیده

استخراج معادن، تغلیظ و حمل و نقل کانی‌ها، جنوب شهر اصفهان و حومه‌ی سپاهان شهر را در معرض آلودگی و ساکنین آن‌ها را به دلیل وجود عناصر سنگین در معرض خطر قرار داده است. امروزه به طور معمول از اسپکتروفتومتر و انعکاس طیفی برای تخمین خصوصیات خاک و غلظت آلوده کننده‌ها استفاده می‌شود. این تحقیق برای مطالعه پتانسیل‌های اطلاعات ماهواره Landsat ETM+ برای تخمین و پهنه‌بندی پراکنش عناصر سنگین در جنوب شهر اصفهان انجام شد. در طی فعالیت میدانی ۱۰۰ نمونه خاک سطحی بصورت تصادفی تهیه شد. نمونه‌ها هوا خشک شده و بخش ریز (ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر) بوسیله اسید نیتریک ۴ مولار در ۸۰°C تیمار شدند و غلظت کل سرب، روی و کادمیم بوسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. آنالیز آماری نشان می‌دهد که همبستگی منفی و معنی داری بین غلظت عناصر سنگین و اطلاعات طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک وجود دارد و نتیجتاً امکان پهنه‌بندی آلوده کننده‌ها به کمک این باندها وجود دارد. پراکنش مکانی غلظت عناصر سرب، روی و کادمیم به کمک چندین معادله رگرسیون چندگانه گام به گام پهنه بندی گردید. نتایج نشان می‌دهد که غلظت آلوده کننده‌های سرب و روی در نزدیکی سپاهان شهر بالای حد آستانه است ولی برای کادمیم در حال حاضر آلودگی خاک جدی نیست.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، عناصر سنگین، Landsat ETM+، پهنه‌بندی

#### مقدمه

عموماً به صورت مدل‌های خطی و با استفاده از معادلات رگرسیون بیان می‌شود. بدین طریق که اطلاعات رقومی بازتاب مربوط به نقاط مورد نظر به عنوان متغیر مستقل و هر یک از خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته و برازش مدل‌های تک و چند متغیره خطی انجام می‌شود. این مدل‌ها ارتباط عددی هر یک از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لایه سطحی خاک را با تعدادی از باندهای طیف الکترومغناطیس بیان می‌کنند. با اعمال ضرایب حاصل از برازش مدل‌های رگرسیونی در تصاویر رقومی منطقه مطالعاتی می‌توان اقدام به پهنه بندی خصوصیات خاک‌های سطحی نمود (۳).

از جمله خصوصیات خاک غلظت عناصر سنگین در خاک است که به دلیل غیر قابل تجزیه بودن و اثرات سوء آن‌ها بر موجودات زنده حائز اهمیت شناخته شده‌اند (۴). عناصر سنگینی چون سرب، روی و کادمیم به دلیل توانایی بالقوه در آسیب رسانی به سلامت انسانها و حیوانات در چند دهه اخیر از نظر مسائل زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و سعی شده است از ورود آنها به چرخه محیط زیست تا حد امکان جلوگیری شود. غلظت سرب در خاک‌ها بین ۱ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و به طور متوسط ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و

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، رنگ خاک، مقدار رطوبت سطحی، مقدار مواد آلی، توزیع اندازه ذرات، رسوب فلزات سنگین، کانی شناسی خاک، ساختمان خاک، ناهمواری سطح خاک، شرایط زهکشی، ترکیبات مختلف شیمیایی و رسوبات بر جای مانده بر سطح خاک تغییر می‌کند (۱۲). در دور کاوی سیمای سطحی زمین، ارزش اعداد رقومی ارسالی از ماهواره در بعضی از بخش‌های طیف الکترومغناطیس ارتباط بسیار نزدیکی با بازتاب‌های سطحی خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکها با بازتاب طیفی آنها

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(Email: khnaderi@yahoo.com

\*) نویسنده مسئول:

مدل برای آلاینده‌های  $\text{Pb}$ ،  $\text{Cd}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{Fe}$ ،  $\text{Mn}$  و  $\text{As}$  به ترتیب برابر  $۰/۶۳$ ،  $۰/۹۱$ ،  $۰/۹۳$ ،  $۰/۸۱$ ،  $۰/۹۳$  و  $۰/۸۶$  بود. یانزاهو و همکاران (۲۰) امکان استفاده از انعکاس طیفی را به عنوان یک روش سریع و همزمان در ارزیابی عناصر آلاینده  $\text{As}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Hg}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Cr}$  در حومه شهر نانجینگ (Nanjing) در چین مورد بررسی قرار دادند. این محققین گزارش دادند که در روش انعکاس طیفی پیش بینی غلظت  $\text{Pb}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{Cr}$  و  $\text{Cu}$  نسبت به  $\text{As}$ ،  $\text{Zn}$  و  $\text{Hg}$  بهتر صورت گرفته است. چو و همکاران (۶) نقشه آلودگی عناصر سنگین را با استفاده از تصاویر اسپکتروفتومتری و تصاویر چند طیفی، در رسوبات رودخانه‌ای در اطراف معدن روداکویلا (Rodaquilar) در اسپانیا به دست آوردند. بدین منظور این محققین از نسبت باندهای  $۶۱۰/۵۰۰$  نانومتر در ناحیه مرئی، مادون قرمز نزدیک و میزان جذب در محدوده  $۲۲۰۰$  نانومتر استفاده کردند. الگوی مکانی مشابهی بین نقشه‌های حاصل از تصاویر چند طیفی و داده‌های اسپکتروفتومتری وجود داشت. البته اختلافاتی نیز وجود داشت که ناشی از تفاوت در قدرت تفکیک مکانی تصاویر چند طیفی و داده‌های اسپکتروفتومتری می‌باشد. نتایج نشان داد که پارامترهای مشتق شده از خصوصیات جذب طیفی خاک‌ها پتانسیل لازم برای تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی عناصر سنگین را دارا می‌باشد. یانگ و همکاران (۱۹) با استفاده از تصاویر Landsat ETM+ و سامانه اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information System, GIS) به ارزیابی خطر آلودگی مکان‌های دفع زباله در پنج نقطه در استان جیانگ زو (Jiangsu) در چین پرداختند. یکی از فاکتورهای مهم در این مطالعه بررسی غلظت عناصر سنگین در این پنج نقطه بود. این محققین نتیجه گرفتند که سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور ابزاری مناسب برای بررسی آلودگی ناشی از دفع زباله‌های شهری در مقیاس وسیع هستند. در همین راستا جک موند و همکاران (۱۰)، فریر (۷)، پارک و میخائیل (۱۴) مطالعات گسترده‌ای را در زمینه کاربرد انعکاس طیفی و تصاویر ماهواره‌ای در بررسی پراکنش عناصر سنگین انجام داده‌اند.

هدف از این مطالعه بررسی رابطه غلظت عناصر سنگین سرب، روی و کادمیم در خاک‌های حومه سپاهان شهر (جنوب اصفهان) با اطلاعات ماهواره‌ی Landsat ETM+ می‌باشد. در صورت وجود روابط معنی دار بین اطلاعات ماهواره‌ای مذکور و غلظت عناصر سنگین در خاک امکان پیش بینی پراکنش مکانی عناصر سرب، روی و کادمیم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت و خصوصیات منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود  $۹۰۰۰$  هکتار در جنوب شهر

حد بحرانی آن  $۵۰$  میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۲۱ و ۲). غلظت روی در خاک بین  $۱۰$  تا  $۳۰۰$  میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار متوسط آن  $۵۰$  حد بحرانی سمیت آن  $۱۲۵$  تا  $۱۵۰$  میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (۱۵). در مورد کادمیم، به طور کلی اکثر خاک‌های غیر آلوده غلظت‌های کمتر از  $۱$  میلی‌گرم بر کیلوگرم را دارند و غلظت بحرانی آن در خاک  $۱/۵$  تا  $۲/۵$  میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۵). هر یک از عناصر ذکر شده اگر بیش از حد معمول وارد چرخه غذایی انسان شوند برای سلامتی بسیار خطرناک خواهند بود.

روش‌های معمول برای پی بردن به میزان آلودگی شیمیایی خاک‌ها بر اساس نمونه‌برداری میدانی و آنالیزهای شیمیایی می‌باشد که مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی هستند. در مقابل استفاده از انعکاس طیفی در محدوده نور مرئی و مادون قرمز نزدیک با سرعت و سهولت بیشتر انجام می‌گیرد و هزینه کمتری را طلب می‌کند (۸). لوسک و همکاران (۱۳) برای مطالعه باقی مانده‌های معدنی در مکان‌های تحت فعالیت استخراج و همچنین بررسی محتوای عناصر سنگین در شمال اسپانیا از داده‌های IKONOS و داده‌های چند طیفی CASI (Compact Airborn Spectrographic Image) استفاده کردند. آن‌ها متوجه شدند که تفکیک‌پذیری طیفی لزوماً برای پیش بینی محتوای عناصر سنگین یک محدودیت نیست چنانچه نتایج حاصل از چهار باند ماهواره IKONOS مشابه نتایج بدست آمده از  $۶۵$  باند داده‌های بسیار طیفی CASI بود. کمپر و سومر (۱۱) طی مطالعه‌ای غلظت عناصر سنگین را در اطراف معدنی در شمال اسپانیا با استفاده از میزان انعکاس باند مادون قرمز نزدیک پهنه‌بندی کردند. نتایج آنالیزهای شیمیایی نشان داد که غلظت  $\text{Zn}$ ،  $\text{Cd}$ ،  $\text{As}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Fe}$ ،  $\text{S}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Hg}$ ،  $\text{Sb}$  بالاتر از مقادیر معمول بود. پیش بینی غلظت عناصر سنگین به وسیله رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام صورت گرفت. پیش بینی  $۶$  عنصر از  $۹$  عنصر فوق با دقت بالا انجام گرفت به طوری که بهترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین غلظت عناصر سنگین اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل برای  $\text{S}$ ،  $\text{Sb}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Hg}$ ،  $\text{Fe}$ ،  $\text{As}$  به ترتیب برابر  $۰/۸۴$ ،  $۰/۷۲$ ،  $۰/۹۶$ ،  $۰/۹۵$ ،  $۰/۸۷$  و  $۰/۹۳$  بود.

یلیامز و مالی (۱۸) از تکنیک‌های سریع و کم هزینه انعکاس اسپکتروفتومتری مادون قرمز نزدیک برای پیش بینی غلظت عناصر سنگین در اطراف رودخانه‌ای در شمال غرب کانادا استفاده کردند. نمونه‌ها توسط باند مادون قرمز نزدیک در طول موج  $۱۱۰۰$  تا  $۲۵۰۰$  نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل  $۶۵۰۰$  اسکن شدند و مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی (Partial Least Square Regression) برای پیش بینی غلظت عناصر سنگین توسط باند مادون قرمز نزدیک مورد استفاده قرار گرفت. مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ )

مجازی استاندارد (Standard False Color Composite) به روش تصادفی تعیین شدند. سپس به کمک دریافت کننده سامانه موقعیت جهانی (Global Positioning System, GPS) نمونه‌ها در منطقه شناسایی شد. در مرحله بعد 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 متر تعداد سه نمونه دیگر برداشت شد، به طوری که نمونه‌ها در سه رأس یک مثلث و به مرکزیت نقطه اصلی مشخص می‌شوند. سپس نمونه خاک‌های بدست آمده از این چهار نقطه خوب با هم مخلوط شدند و در نهایت یک نمونه مرکب از آنها بدست آمد. شکل (۱) موقعیت مکان‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که نمونه‌برداری خاک در بهار ۱۳۸۶ (۲۰۰۷ میلادی) انجام گردید در حالیکه تصاویر ماهواره‌ای مربوط به بهار ۲۰۰۲ میلادی می‌باشند. البته مناسب آن است که نمونه‌برداری میدانی در هنگام یا نزدیک به زمان برداشت اطلاعات ماهواره‌ای انجام گیرد ولی شرایط منطقه مورد مطالعه طوری است که به نظر نمی‌رسد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در غلظت عناصر مورد بررسی در فاصله زمانی پنجساله رخ داده باشد. با توجه به اینکه نمونه‌برداری در مناطق غیر کشاورزی انجام شده است بنابراین منطقه دست‌خوش عملیات کشاورزی نبوده است از سوی دیگر متوسط بارندگی منطقه حدود ۱۱۵ میلی‌متر است (۱). بنابراین شستشوی خاک و املاح محلول نیز قابل ملاحظه نیست و منجر به رشد گیاهان مرتعی قابل ملاحظه و تأثیر گذاری هم در منطقه نمی‌گردد. از سوی دیگر غلظت کل عناصر در کانیهای خاک اندازه‌گیری می‌شوند که کمتر تحت تأثیر آبشویی قرار می‌گیرند. با توجه به موارد ذکر شده به نظر نمی‌رسد تغییر غلظت عناصر مورد مطالعه در طی پنجسال قابل ملاحظه و تأثیر گذار باشد.

اصفهان و در حومه سپاهان شهر واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را بر روی تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد. در قسمت‌های جنوبی اراضی منطقه سپاهان شهر، معدن دولتی باما و چند معدن خصوصی دیگر وجود دارد که غنی از رگه‌های سرب و روی می‌باشند. گسترش فعالیت‌های معدنی مانند استخراج، تغلیظ و حمل و نقل امکان آلودگی اراضی این ناحیه را فراهم کرده است. کاربری اراضی استخراج و تغلیظ سرب و روی می‌باشد و جز در قسمت شرق منطقه کاربری کشاورزی وجود ندارد. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۶۰۵ متر و بارندگی سالیانه منطقه براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی استان اصفهان بین ۷۵ تا ۲۰۰ میلی‌متر و متوسط سالیانه ۱۱۵ میلی‌متر می‌باشد که عمدتاً در ماههای پاییز و زمستان بوقوع می‌پیوندد. میانگین دمای سالیانه  $18/3^{\circ}\text{C}$  با متوسط حداقل  $15/6^{\circ}\text{C}$  و متوسط حداکثر  $22/9^{\circ}\text{C}$  می‌باشد (۱).

### اطلاعات ماهواره‌ای

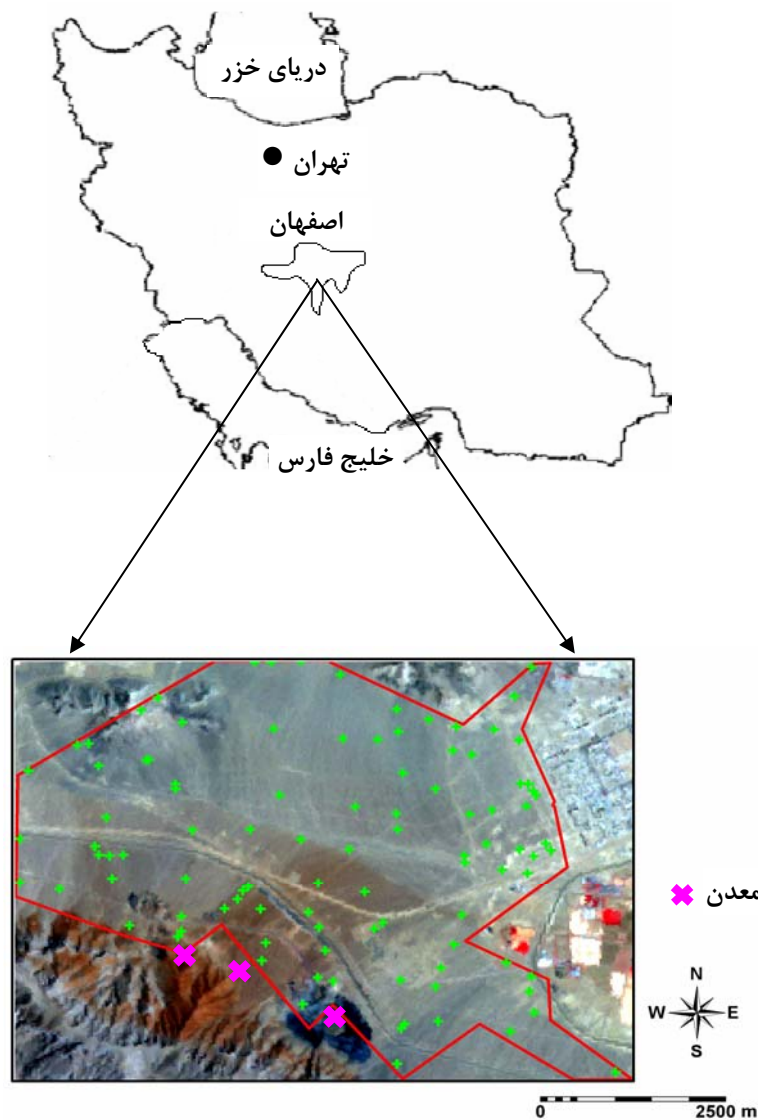
اطلاعات ماهواره‌ای مورد نیاز از طریق مرکز سنجش از دور ایران تهیه گردید. این تصاویر مربوط به ماهواره Landsat 7 و شامل اطلاعات رقومی هفت باند سنجنده ETM+ می‌باشد که در سال ۲۰۰۲ برداشت شده‌اند. تصاویر مذکور جدیدترین اطلاعات ماهواره‌ای لندست داخل کشور در زمان تحقیق بودند. باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ دارای ۲۱۲ سطر و ۲۹۱ ستون و باند شش دارای ۱۰۷ سطر و ۱۴۵ ستون می‌باشند (جدول ۱). تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای به کمک نرم افزار ILWIS 3.3 انجام گردید (۹).

### داده‌های میدانی

نمونه‌برداری از خاک در بهار ۱۳۸۶ (۲۰۰۷ میلادی) انجام گرفت. ابتدا موقعیت ۱۰۰ نقطه‌ای نمونه‌برداری روی تصویر ترکیب رنگی

(جدول ۱) - مشخصات باندهای سنجنده ETM+

نام باند	شماره باند	محدوده طیفی (میکرومتر)	قدرت تفکیک مکانی (متر)	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار (Std)	ضریب تغییرات (C.V.%)
آبی	۱	۰/۴۵ - ۰/۵۱۵	۳۰	۷۶	۲۵۵	۱۶۵/۵	۵/۹۲	۳/۵۷
سبز	۲	۰/۵۲۵ - ۰/۶۰۵	۳۰	۶۱	۲۵۵	۱۵۸	۸/۱۱	۵/۱۳
قرمز	۳	۰/۶۳ - ۰/۶۹	۳۰	۶۶	۲۵۵	۱۶۵/۵	۱۱/۲۴	۶/۷۹
مادون قرمز نزدیک	۴	۰/۷۵ - ۰/۹۰	۳۰	۳۱	۱۶۵	۹۸	۴/۹۵	۵/۰۵
مادون قرمز میانی	۵	۱/۵۵ - ۱/۷۵	۳۰	۴۱	۲۵۵	۱۴۸	۱۰/۷۶	۷/۲۷
مادون قرمز حرارتی	۶	۱۰/۴ - ۱۲/۵	۶۰	۱۱۹	۱۹۲	۱۵۵/۵	۲/۵۷	۱/۶۵
مادون قرمز میانی	۷	۲/۰۹ - ۲/۳۵	۳۰	۳۵	۲۵۵	۱۴۵	۱۰/۳۱	۷/۱۱



(شکل ۱) - موقعیت منطقه مورد مطالعه و الگوی نمونه‌برداری بر روی تصویر ماهواره‌ای

شد. لازم به ذکر است که آنلیزهای شیمیایی با دو تکرار انجام شدند و طی نمونه‌برداری و در تمام طول آنالیزهای آزمایشگاهی رعایت اصول برای جلوگیری از آلودگی به عمل آمد.

### تجزیه و تحلیل آماری

آمار توصیفی آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های خاک تهیه گردید و رابطه همبستگی بین غلظت عناصر سنگین (Cd و Zn, Pb) در نمونه‌ها با ارزش‌های رقومی (Digital Value) نقاط نظیر روی باندهای اطلاعات ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در صورت وجود رابطه معنی‌دار بین غلظت عناصر سنگین در خاک و ارزش‌های

### آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های مرکب خاک به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از هوا خشک کردن، خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. هضم نمونه‌ها و آزادسازی عناصر به روش توصیه شده توسط اسپوزیتو و همکاران (۱۶) انجام شد. بر این اساس با در نظر گرفتن رطوبت خاک‌ها، به ۲ گرم نمونه خاک ۱۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ مولار اضافه شد. نمونه‌ها یک شب در داخل حمام ماری در حرارت ۸۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند و سپس محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد. غلظت عناصر روی، سرب و کادمیم محلول به وسیله دستگاه جذب اتمی و Induced Coupled Plasma (ICP) تعیین

داده‌اند نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. برای مثال یانزاهو و همکاران (۲۰) در بررسی عناصر سنگین با استفاده از انعکاس طیفی در حومه شهر نانجینگ در چین به این نتیجه رسیدند که طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک دارای یک همبستگی منفی و معنی داری با محتوی عناصر سنگین در خاک هستند. فریر و همکاران (۷) در بررسی محتوی عناصر سنگین با استفاده از داده‌های اسپکتروفتومتری در اراضی اطراف معدن روداکویلا در اسپانیا اعلام داشتند که عناصر سنگین همبستگی منفی و معنی‌داری با طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک دارند. این محققین گزارش دادند که محتوی سرب، روی، آهن و نیکل در خاک باعث جذب طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌شوند. کمپر و سومر (۱۱) با استفاده از داده‌های اسپکتروفتومتری و اطلاعات باند مادون قرمز نزدیک محتوی برخی از عناصر سنگین را در اطراف رودخانه‌ای در اسپانیا بررسی کردند. این محققین گزارش دادند که عناصر سرب، آهن، سلنیم، جیوه و گوگرد همبستگی منفی و معنی‌داری با اطلاعات باند مادون قرمز نزدیک دارند. با توجه به این همبستگی این محققین بیان نمودند که عناصر سنگین در خاک باعث جذب طول موج مادون قرمز نزدیک می‌شوند. ویلیامز و مالی (۱۸) در بررسی محتوی عناصر سنگین در رسوبات اطراف رودخانه‌ای در شمال غرب کانادا از تکنیک‌های انعکاس اسپکتروفتومتری نور مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. این محققین گزارش دادند که غلظت عناصر سرب، روی، کادمیم، نیکل، منگنز و آهن همبستگی منفی و معنی داری با اطلاعات باندهای آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک دارند. با توجه به این نتایج، این محققین بیان نمودند که محتوی عناصر سنگین در خاک باعث کاهش بازتاب در طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌شوند. چویی و همکاران (۶) برای بررسی محتوی عناصر سنگین در اراضی کشاورزی اسپانیا از داده‌های اسپکتروفتومتری استفاده کردند. این محققین گزارش کردند که طیف نور مرئی و مادون قرمز نزدیک همبستگی منفی و معنی داری با غلظت عناصر سرب، روی و آرسنیک دارند. بنابراین بیان نمودند که محتوی عناصر سنگین در خاک باعث کاهش بازتاب در طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌شوند.

رقومی نقاط نظیر روی باندها یا نسبت باندها سعی به عمل آمد که مناسب‌ترین مدل رگرسیون برای پیش بینی غلظت عناصر به کمک داده‌های ماهواره‌ای برازش گردد. در مدل برازش شده ارزش رقومی بازتاب نقاط در باندهای اطلاعات ماهواره‌ای یا نسبت ارزش رقومی بازتاب در باندها بعنوان متغیرهای مستقل و غلظت عناصر مورد بررسی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. به کمک سامانه اطلاعات جغرافیائی ارزش رقومی باندهای اطلاعات ماهواره‌ای یا نسبت باندها در مدل برازش شده قرار گرفتند و پهنه‌بندی عناصر روی، سرب و کادمیم انجام شد.

به منظور ارزیابی مدل‌های برازش داده شده ۲۰ درصد داده‌ها (غلظت ۲۰ نمونه خاک) به صورت تصادفی انتخاب و قبل از بسط مدل‌ها کنار گذاشته شدند و سپس برای ارزیابی مدل‌ها بکار گرفته شدند. آنالیزهای آماری در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Statistica (۱۷) انجام گرفت.

## نتایج و بحث

جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که میانگین غلظت سرب، روی و کادمیم به ترتیب ۱۰۱/۸۷، ۲۵۰/۳۳ و ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد. با توجه به اینکه حد بحرانی عنصر سرب در خاک ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۲۱ و ۲) و این حد برای روی ۱۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۱۵) بنابراین غلظت متوسط این دو عنصر بالاتر از حد بحرانی آلودگی خاک می‌باشد. در مورد کادمیم غلظت بحرانی آن در خاک ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۵) و متوسط غلظت کادمیم در خاک‌های منطقه پایین تر از حد بحرانی آن در خاک می‌باشد.

همبستگی بین غلظت عناصر سنگین در خاک و ارزش رقومی باندهای سنجنده ETM+ محاسبه شد (جدول ۳). این جدول نشان می‌دهد که بین مقادیر عناصر سنگین و میزان بازتاب در باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک همبستگی منفی و معنی داری ( $P < 0.01$ ) وجود دارد. با افزایش طول موج از مادون قرمز نزدیک به بعد همبستگی معنی داری بین غلظت عناصر سنگین و بازتاب باندها مشاهده نمی‌شود. در مطالعاتی که دیگران در دیگر نقاط دنیا انجام

(جدول ۲) - خلاصه آماری داده‌های مربوط به غلظت سرب، روی و کادمیم کل در منطقه

عنصر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	میان	انحراف معیار (Std.)	ضریب تغییرات (C.V. %)
سرب کل	mg kg <sup>-1</sup> soil	۳/۱۷	۶۲۰/۰۰	۱۰۱/۸۷	۹۷/۳۳	۱۴۳/۶۸	۷۳/۰۰
روی کل	mg kg <sup>-1</sup> soil	۵۳/۷۵	۱۰۰۵/۰۰	۲۵۰/۳۳	۱۹۴/۲۵	۱۸۲/۰۹	۷۲/۷۳
کادمیم کل	mg kg <sup>-1</sup> soil	۰/۰۱	۴/۰۷	۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۸۴	۹۵/۰۰

(ادامه جدول ۲) - همبستگی بین غلظت عناصر سنگین در خاک با ارزش رقومی بازتاب در باندهای ماهواره‌ای

	band1	band2	band3	band4	band5	band6	band7
Pb	-۰/۷۹**	-۰/۶۸**	-۰/۵۶**	-۰/۳۵**	۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۲
Zn	-۰/۷۳**	-۰/۷۵**	-۰/۵۷**	-۰/۳۵**	۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۲
Cd	-۰/۷۵**	-۰/۶۶**	-۰/۶۱**	-۰/۴۲**	-۰/۱۸	-۰/۰۵	-۰/۰۵

\*\*\* (P<0.01)

(جدول ۳) - رابطه رگرسیون خطی بین عناصر سنگین (سرب، روی و کادمیم) و باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک

متغیر وابسته	معادله رگرسیون	R <sup>2</sup>
Pb	-۱۷/۷۴ (band1)+۲۱۶۶/۴۰	۰/۶۵
Pb	-۱۱/۰۹ (band2)+۱۳۹۰/۵۰	۰/۵۰
Pb	-۶/۱۵۳ (band3)+۱۰۱۴/۸۰	۰/۳۰
Pb	-۴/۷۰ (band4)+۴۵۵/۶۷	۰/۲۵
Zn	-۲۲/۵۲ (band1)+۲۸۷۹/۱۰	۰/۵۵
Zn	-۱۵/۲۶ (band2)+۲۰۳۲/۶۰	۰/۵۰
Zn	-۸/۷۰ (band3)+۱۵۵۱/۶۰	۰/۳۵
Zn	-۷/۰۵ (band4)+۷۸۷/۲۸	۰/۲۰
Cd	-۰/۰۹ (band1)+۱۱/۶۰	۰/۵۰
Cd	-۰/۰۵ (band2)+۰/۳۷	۰/۴۵
Cd	-۰/۰۳ (band3)+۰/۳۳	۰/۳۳
Cd	-۰/۰۵ (band4)+۰/۱۵	۰/۲۷

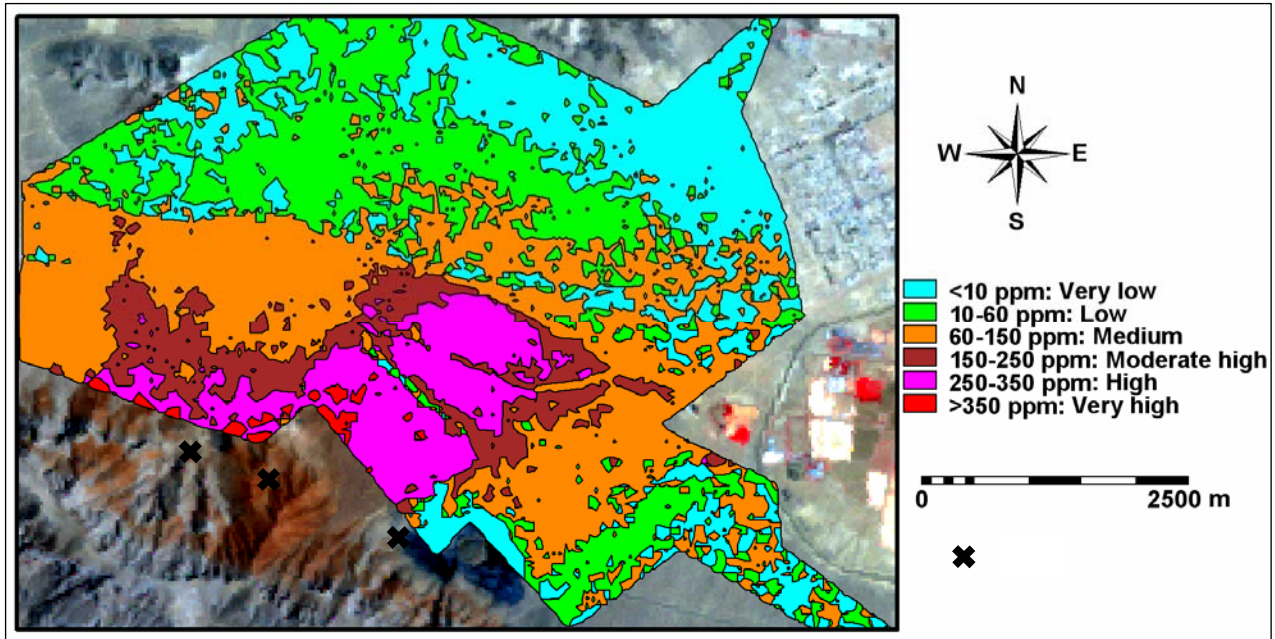
بود. کمپر و سومر (۱۱) در بررسی پراکنش سرب در اسپانیا با استفاده از رگرسیون چند متغیره گام به گام از اطلاعات باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. با استفاده از معادله شماره ۱ پراکنش مکانی غلظت سرب در منطقه مورد مطالعه تخمین زده شد (شکل ۲). بررسی پراکنش مکانی غلظت سرب نشان می‌دهد که در اطراف معادن آلودگی حداکثر و با افزایش فاصله از معدن میزان آلودگی کاهش می‌یابد. متوسط طبیعی سرب در اکثر خاک‌ها ۱۵ پی پی ام و حد بحرانی آن ۵۰ پی پی ام می‌باشد (۲۱ و ۲). نقشه به دست آمده نشان می‌دهد که کلاس ۱۰ تا ۶۰ پی پی ام در اطراف شهر گسترده شده است. غلظت‌های ۶۰ تا ۱۵۰ پی پی ام نیز در نزدیکی شهر مشاهده می‌شود که با توجه به پیشرفت شهر به سمت غرب و جنوب غربی منطقه (یعنی به سمت معادن) این امر احتمالاً برای ساکنین منطقه خطرناک می‌باشد. کلاس‌های ۱۵۰ تا ۲۵۰ پی پی ام و ۲۵۰ تا ۳۵۰ پی پی ام نیز با آلودگی بسیار بالا از نظر مکانی فاصله چندانی با شهر ندارند.

با توجه به ادامه جدول شماره ۲ امکان تخمین غلظت فلزات سنگین Pb, Zn و Cd به کمک باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک وجود دارد. جدول شماره ۳ رابطه رگرسیون خطی بین عناصر سنگین مذکور و باندهای اشاره شده را نشان می‌دهد. مدل‌های چند متغیره برای بررسی رابطه بین هر کدام از عناصر سنگین با بازتاب در باندهای ماهواره‌ای و نسبت‌های باندی به کار گرفته شدند و بین مدل‌های حاصله مدلی که بیشترین ضریب تبیین را به خود اختصاص می‌داد برای تخمین غلظت عناصر سنگین و ارزیابی در مرحله بعد انتخاب شدند. در این بین مدل‌های رگرسیونی خطی گام به گام بیشترین ضریب تبیین را به خود اختصاص دادند.

معادله شماره ۱ مدل استفاده شده برای تخمین غلظت سرب را نشان می‌دهد. در این مدل از band1 و نسبت باندی band3/band4 استفاده شده است.

چو و همکاران (۶) در بررسی پراکنش عناصر سنگین در اطراف معدن روداکویلا در اسپانیا از رگرسیون چند متغیره گام به گام استفاده کردند که در معادلات مربوط به تخمین غلظت سرب از اطلاعات باندهای آبی و قرمز به عنوان متغیر مستقل استفاده شده

$$\text{Pb}_{\text{mg kg}^{-1} \text{ soil}} = 278/793 - 7/643 (\text{band1}) - 932 / 522 (\text{band 3/band4}) \quad R^2 = 0/72 \quad \text{معادله (۱)}$$



شکل ۲- پیش بینی غلظت سرب در خاک‌های منطقه با استفاده از معادله شماره ۱

$$Zn_{mg\ kg^{-1}\ soil} = 369/29 - 981/64 (band3/band4) - 22/446(band2) + 1714/83(band3/band6) \quad R^2 = 0/62 \quad (2)$$

از حد معمول آن در خاک بیشتر است. همچنین کلاس غلظت ۲۰۰ تا ۳۵۰ پی پی ام نیز در اراضی نزدیک شهر مشاهده می‌شود که غلظت روی در آنها بیش از حد بحرانی آن در خاک می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده آلودگی خاک‌های منطقه به ترکیبات روی مسجل می‌باشد.

معادله شماره ۳ مدل رگرسیون چند متغیره برای تخمین غلظت کادمیم را نشان می‌دهد. در این مدل از band1 و نسبت‌های band3/band4 و band6/band7 استفاده شده است.

کمپر و سومر (۱۱) در بررسی پراکنش آلودگی کادمیم در اسپانیا از رگرسیون چند متغیره گام به گام و اطلاعات باندهای قرمز، سبز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. ویلیامز و مالی (۱۸) در بررسی پراکنش کادمیم در شمال غرب کانادا با استفاده از حداقل مربعات جزئی از اطلاعات باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند.

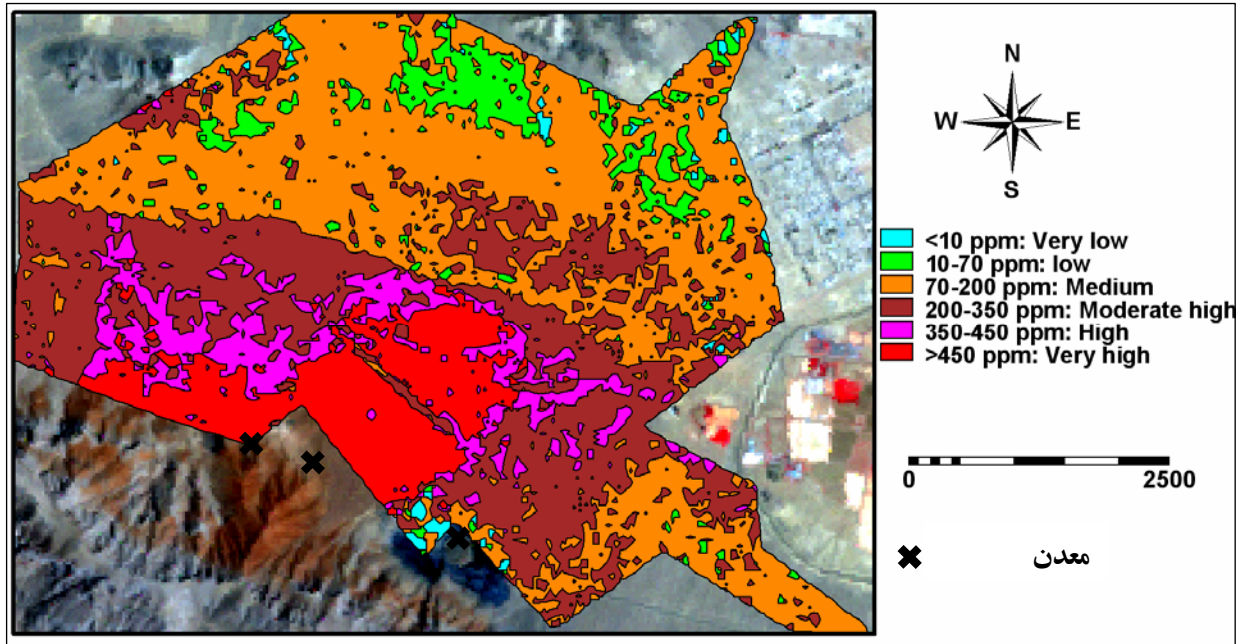
با استفاده از معادله شماره ۳ و اطلاعات باندهای ۱، ۳، ۴، ۶ و ۷ نقشه پراکنش غلظت کادمیم در منطقه تهیه شد (شکل ۴). در این نقشه آلودگی در اطراف معادن حداکثر و با افزایش فاصله از معادن میزان آلودگی کاهش می‌یابد. غلظت کادمیم در اکثر خاک‌ها بین ۰/۱ تا ۱ پی پی ام و حد بحرانی آن ۱/۵ تا ۲/۵ پی پی ام می‌باشد (۵). با توجه به نقشه، غالب خاک‌های منطقه در کلاس با غلظت کمتر از ۱/۱ پی پی ام قرار گرفته‌اند و خاک‌های اطراف شهر هم به طور

معادله شماره ۲ مدل تهیه شده برای تخمین پراکنش مکانی روی را نشان می‌دهد. در این مدل از band2 و نسبت‌های باندهای band3/band4 و band3/band6 استفاده شده است.

چو و همکاران (۶) در بررسی پراکنش عناصر سنگین در اطراف معدن رودکویلار در اسپانیا از رگرسیون چند متغیره گام به گام استفاده کردند که در معادلات مربوط به تخمین غلظت روی از اطلاعات باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک به عنوان متغیر مستقل استفاده شده بود. ویلیامز و مالی (۱۸) در بررسی پراکنش روی در شمال غرب کانادا از رگرسیون حداقل مربعات جزئی و اطلاعات باندهای سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. کمپر و سومر (۱۱) در بررسی پراکنش روی در اسپانیا با استفاده از رگرسیون چند متغیره گام به گام از اطلاعات باندهای قرمز، سبز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. با استفاده از معادله شماره ۲ نقشه پراکنش غلظت روی در خاک‌های منطقه تهیه شد (شکل ۳). نقشه مذکور نشان می‌دهد که در اطراف معادن آلودگی حداکثر و با افزایش فاصله آلودگی کاهش می‌یابد. نکته‌ای که بسیار حائز اهمیت است وضعیت قرار گرفتن کلاس‌های آلودگی در اطراف شهر است. حد متوسط و نرمال روی در اکثر خاک‌ها ۵۰ پی پی ام و حد بحرانی آن ۱۲۵ تا ۱۵۰ پی پی ام است (۱۵). بیشتر خاک‌های منطقه در کلاس با غلظت ۷۰ تا ۲۰۰ پی پی ام قرار گرفته‌اند و این کلاس تا نزدیکی شهر توسعه یافته است. بنابراین غلظت روی در خاک‌های این مناطق

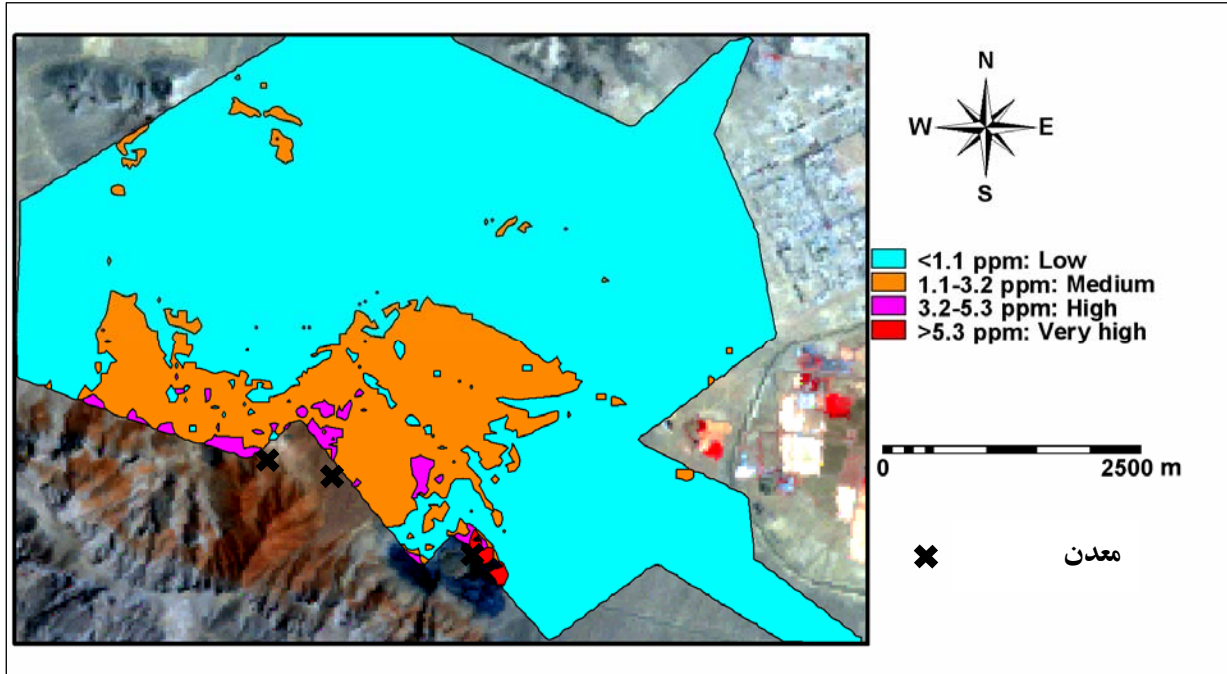


کامل در این کلاس قرار می‌گیرند. بنابراین خاک‌های منطقه از لحاظ غلظت کادمیم در وضعیت بحرانی نمی‌باشند.



(شکل ۳) - پیش بینی غلظت روی در خاکهای منطقه با استفاده از معادله شماره ۲

$$Cd_{mg\ kg^{-1}\ soil} = 12 / 0.35 - 0.0408 (band1) - 4/491 (band3/band4) + 1/657 (band6/band7) \quad R^2 = 0.70 \quad \text{معادله (۳)}$$



(شکل ۴) - پیش بینی غلظت کادمیم در خاکهای منطقه با استفاده از معادله شماره ۳



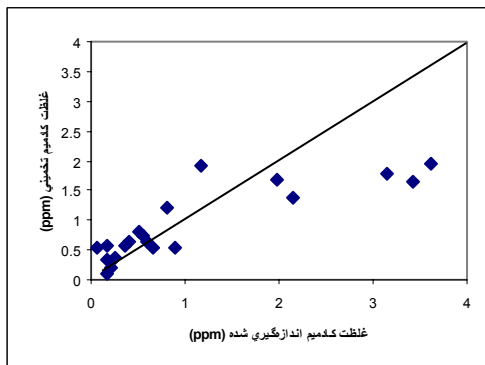
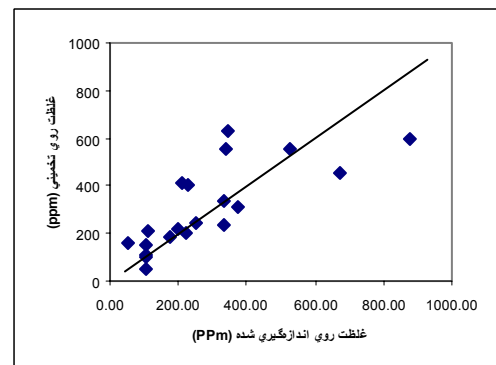
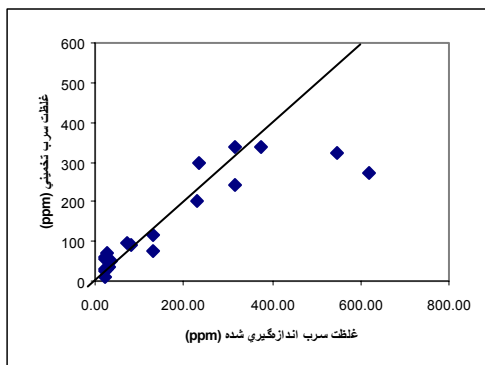
### ارزیابی دقت برآورد معادلات رگرسیون چند متغیره

همانطور که در بخش مواد و روشها اشاره شد برای ارزیابی دقت معادلات رگرسیون چند متغیره شماره ۱، ۲ و ۳ که رابطه بازتاب سطحی زمین را با غلظتهای سرب، روی و کادمیم در خاک نشان می دهند از غلظت عناصر مورد بررسی در ۲۰ نمونه خاک استفاده شد. غلظتهای سرب، روی و کادمیم این ۲۰ نمونه خاک مانند دیگر نمونه ها اندازه گیری شدند منتهی غلظت عناصر و بازتاب زمینی آنها برای برآورد معادلات رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفتند. پس از محاسبه مدل های رگرسیون چند متغیره، بازتاب های خاک در ۲۰ نقطه در باندهای اطلاعات ماهواره ای مربوطه مشخص شدند و به ترتیب برای تخمین غلظت عناصر سرب، روی و کادمیم در معادلات ۱، ۲ و ۳ قرار گرفتند. شکل شماره ۵ رابطه غلظتهای سرب، روی و کادمیم اندازه گیری شده و تخمینی را نشان می دهد. با استفاده از خطوط ۱:۱ ترسیم شده بر نمودارهای شکل ۵ کیفیت تخمین عناصر مورد مطالعه ارزیابی می شود. در مورد دقت معادله شماره ۱ برای برآورد سرب شکل ۵ نشان می دهد که برای غلظت های زیر ۴۰۰ پی پی ام میزان سرب برآورد شده و اندازه گیری شده حول خط ۱:۱ قرار دارند و رابطه خطی بین این دو مقدار وجود دارد. در غلظت های پایین نقاط در نزدیکی خط ۱:۱ قرار دارند که نشانه دقت بیشتر معادله برای تخمین سرب در غلظتهای پایین است ولی در غلظتهای بالاتر از ۴۰۰ پی پی ام

مقادیر تخمینی سرب بسیار کمتر از مقادیر واقعی هستند. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمینی سرب برابر ۰/۸۸ است که رابطه ای نسبتاً قوی بین این دو مقدار را نشان می دهد. در مورد عنصر روی شکل ۵ نشان میدهد که نقاط در غلظتهای پایین در فاصله کمتری از خط ۱:۱ قرار دارند و با افزایش غلظت روی در خاک خطای تخمین افزایش می یابد به طوری که برای مقادیر اندازه گیری شده بالاتر از ۶۰۰ پی پی ام مقادیر تخمینی توسط مدل بسیار کمتر از مقادیر اندازه گیری شده می باشند. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمینی روی ۰/۷۶ می باشد. ضریب همبستگی (r) بین کادمیم اندازه گیری شده و تخمینی برابر ۰/۸۶ است که نشانگر رابطه ای نسبتاً قوی بین این دو مقدار می باشد. شکل شماره ۵ نشان می دهد که کرائی معادله شماره ۳ برای غلظتهای پایین نسبتاً مناسب می باشد ولی مقادیر برآورد شده برای غلظتهای بالا از غلظت واقعی کمتر است.

### نتیجه گیری

اطلاعات مربوط به غلظت بالای فلزات سنگین به خصوص در مورد سرب و روی حاکی از افزایش این عناصر در اراضی اطراف سپاهان شهر است.



(شکل ۵) - غلظتهای سرب، روی و کادمیم اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از معادلات شماره ۱، ۲ و ۳

در منطقه به خوبی نشان دهند. ارزیابی مدل‌های حاصله برای تخمین غلظت عناصر سنگین نشان داد که مدلها برای برآورد غلظتهای پایین کارایی بیشتری دارند همچنین مدل مربوط به سرب و کادمیم از دقت بالاتری نسبت به مدل مربوط به روی برخوردارند ولی در هر سه مدل مقادیر برآورد شده در غلظتهای بالا کمتر از مقادیر واقعی می‌باشد.

لذا پیشنهاد می‌شود با نظرات سازمان‌های مربوطه از قبیل سازمان حفاظت محیط زیست، فعالیتهای اکتشاف و استخراج معادن با رعایت استانداردهای مربوطه انجام گیرد تا از افزایش آلودگی بیشتر جلوگیری شود. مطالعه نقشه‌های بدست آمده در این تحقیق نشانگر پتانسیل قابل توجه داده‌های ماهواره‌ای در تهیه نقشه‌های آلودگی عناصر سنگین می‌باشد. این نقشه‌ها قادرند روند تغییرات آلودگی را

## منابع

- ۱- سایت اطلاعات هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۸۷. ([www.esfahanmet.ir](http://www.esfahanmet.ir))
- ۲- صاحب‌قدم لطفی ع. ۱۳۶۷. متابولیسیم سرب و مسمومیت های ناشی از آن، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- ۳- محمدی ج. و چیت ساز و. ۱۳۸۱. مقایسه تخمین‌گرهای ژئواستاتیستیک و رگرسیون خطی جهت برآورد برخی از خصوصیات خاک سطحی به کمک داده های رقومی TM، مجله علوم آب و خاک، جلد شانزدهم، شماره دوم.
- ۴- وهاب زاده ع. ۱۳۷۲. مبانی محیط زیست، چاپ اول، جهاد دانشگاهی مشهد.
- 5- Bolan N.S., Adriano B.C. and Mani P.A. 2003. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. *Plant and Soil*. 251: 187-198.
- 6- Choe E., Meer F.V. and Ruitenbeek F.V. 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.
- 7- Ferrier G. 1999. Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar, Spain. *Remote Sensing of Environment*. 68: 125-137.
- 8- Grossl P.R. and Sparks D.L. 1995. Evaluation of contamination adsorption/desorption on goethite using pressure-jump relaxation kinetics. *Geoderma*. 67: 87-101.
- 9- ILWIS Academic. 2000. Institutionalization of GIS for urban disaster management, ILWIS 3.3, Netherland, ITC.
- 10- Jacquemond S., Ustin S.L. and Andreoli G. 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environmental*. 56: 194-202.
- 11- Kemper T. and Sommer S. 2002. Estimate heavy metal contamination in soil after a mining accident using reflectance. *Spectroscopy. Environ Sci. Technol*. 36: 2742-2747.
- 12- Metternicht G.I. and Zink J.A. 1997. Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces. *Int. Remote Sensing, J*. 12: 2571 – 2586.
- 13- Levesque J., Stanz K. and Seeredi T. 2000. The impact of spectral band characteristics on unmixing of CASI data for monitoring mine tailings site rehabilitation. *Can. J. Remote Sens*. 76: 231-240.
- 14- Park M.H. and Michael K.S. 2006. Using satellite imagery for stormwater pollution management with Bayesian networks. *Water Reseach*. 40: 3429-3438.
- 15- Pendias K. and Pendias H. 1992. Trace elements in soil and plant. C. R.C. Press.
- 16- Sposito G., Lund L.J. and Chang A.C. 1982. Trace Metal chemistry in air-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. 2001. STATISTICA, (Data Analysis Software System), Version 6.0.
- 18- Williams P.C. and Malley D.F. 1997. Use of Near-Infrared reflectance spectroscopy in prediction of heavy metal in freshwater sediments by their association with organic matter. *Environ. Sci. Technol*. 31: 3461-3467.
- 19- Yang K., Zhou N. and Steimann P. 2008. Landfills in Jiangsu province, China, and potential threats for public health: Leachate appraisal and spatial analysis using geographic information system and remote sensing. *Waste Management*. 127: 768-776.
- 20- Yanzaho W., Jun C., Xinmin W. and Qingjiu T. 2005. Possibilities of reflectance spectroscopy for assessment of contamination element in suburban soil. *Applied Geochemistry*. 20: 1051-1059.
- 21- Zimdahi R. L. and Skogerboe R.K. 1997. Behavior of Lead in soil. *Environ. Sci. Technol*. 11: 1202-1207.



## Mapping Concentrations of Pb, Zn and Cd in Soils Using Landsat ETM+ Data in Southern Isfahan

M. Dayani<sup>1</sup> - M. Naderi<sup>2\*</sup> - J. Mohammadi<sup>3</sup>

### Abstract

Mine excavation, concentration and transportation of minerals make Southern Esfahan municipality and suburb of Sepahanshahr vulnerable to pollution and endanger their people by heavy metals. Nowadays, spectrophotometers and spectral reflectance of soils in different parts of spectrum are applied for estimating soil characteristics and pollutants. This research was conducted to study the potential of Landsat ETM+ data for estimating and mapping spatial distribution of heavy elements in the Southern Isfahan municipality. During a field survey 100 surface soil samples were collected randomly. Samples were air dried and fine earth was treated by 4 M HNO<sub>3</sub> (at 80 °C) and total Pb, Zn and Cd concentration was measured by Atomic Absorption Spectrophotometer and ICP. Statistical analysis reveals negative and significant correlation coefficient between concentration of heavy metals and visible and NIR data and consequently, possible delineation of heavy metals. Spatial distribution of Pb, Zn and Cd concentration mapped using several stepwise multiple regression equations. Results indicate that concentration of Pb, and Zn are above the thresholds and that of Cd is not serious at the moment in proximity of Sepahanshahr.

**Keywords:** Soil pollution, Heavy metal, Landsat ETM+, Mapping

---

1,2,3 - Former MSc. Student, Assistant Professor and Associate Professor of Soil Science, respectively, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture Shahre kord University  
(\* - Corresponding author Email: Khnaderi@yahoo.com)