

بررسی کاربرد سنجش از دور و تاثیرات آن در پایش آلودگی فلزات سمی

سید مهدی آقایی دوست^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۳۰

چکیده

آلودگی محیط زیست و خطرهای آن از چالش های مهم امروزی بشر و دیگر موجودات زنده می باشد. هم چنین افزایش جمعیت، توسعه فناوری و تولیدات صنعتی می تواند سبب عدم توجه به ایمنی محیط زیست شود و به دنبال آن آلودگی اکوسیستم رادر پی داشته باشد.

از این رو بررسی فلزات سمی موجود در خاک و آب با هدف پایش سلامت آن ها و همچنین تعیین قوانین و دستورالعمل های مناسب ضروری می نماید. بررسی سنتی توزیع فضایی غلظت فلزات سمی توسط نمونه برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی متعدد صورت می گیرد که به نوبه خود بسیار زمان بر، پرهزینه و با کارایی کم است.

از تکنیک های مدرن برای پایش مناطق آلوده، می توان به تکنیک های دورسنجی اشاره نمود. که هدف از استفاده از این تکنیک با صرفه بودن هزینه و در کمترین زمان ممکن است. که یکی از اهداف این پژوهش تا با چگونگی استفاده از این تکنیک در پایش فلزات سمی بیشتر آشنا شد. و همچنین به بررسی روش و مطالعاتی که از آن برای پایش فلزات سمی در محیط زیست استفاده نموده اند پرداخته می شود.

واژگان کلیدی: سنجش از دور، طیف سنجی، فلزات سمی، پایش.

^۱ دانشجوی ترم آخر کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری گرایش سنجش از دور، دانشگاه حکمت

مقدمه

فلزات سمی زیر مجموعه ای از فلزات هستند که تعاریف زیادی برای آن‌ها پیشنهاد کرده اند. این تعاریف بر اساس چگالی، عدد اتمی، وزن اتمی، برخی خصوصیات شیمیایی و همچنین سمی بودن آن‌ها ارائه گردیده است. آنچه بسیاری از تعاریف بر روی آن توافق دارند چگالی بالای ($>5\text{g.cm}^{-3}$) این گروه از فلزات می باشد. چهار منبع بزرگ و شناخته شده فلزات سمی که مستقیماً با فعالیت‌های انسانی در ارتباط هستند عبارتند از [۱]:

۱- زهاب اسیدی معدن (AMD) که در اثر فعالیت‌های معدنکاری ایجاد می‌گردد.

۲- صنعت آبکاری^۲

۳- تولید انرژی با سوخت‌های زغالی

۴- فعالیت‌های هسته ای همراه با معدنکاری اورانیوم و فراوری آن و تولید باطله

از سایر صنایع که این نوع آلودگی را ایجاد می‌نمایند می‌توان به کود شیمیایی، دباغی، باطری سازی، کاغذ سازی، ساخت حشره کش‌ها و ... اشاره نمود [۲].

بسیاری از فلزات ایجاد شده توسط فعالیت‌های فوق به صورت کاتیون‌های ساده در طبیعت حضور دارند. دو دلیل عمده برای تمایل به حذف فلزات از محلول‌های آبی عبارت است از [۳]:

۱- حذف سمیت آنها (جنبه زیست محیطی)

۲- بازیابی فلزات ارزشمند (جنبه اقتصادی)

توزیع و انتشار فلزات سمی در محیط زیست موضوعی با اهمیت است، چرا که خاک و آب آلوده بر سلامتی ساکنان مناطق اطراف تأثیر منفی می‌گذارد. برخی از این فلزات برای محیط زیست و سلامت جانداران مضر بوده (مانند کروم، سرب، آرسنیک، کادمیوم و جیوه)، برخی از آن‌ها سبب خوردگی شده (مانند سرب و روی) و برخی دیگر به جهت دیگر مضر هستند [۴]. این فلزات به دلیل سمیت، تمایل به حضور در ساختار گیاهان و ماندگاری در طبیعت نگرانی‌های بسیاری را متوجه خود ساخته اند.

از نظر اتحادیه اروپا ۱۲ عنصر که بیشترین نگرانی را ایجاد می‌نمایند عبارتند از: کروم، کبالت، کادمیوم، آرسنیک، تلوریوم، قلع، سرب، نیکل، منگنز، جیوه، روی و مس. برخی از این عناصر به میزان بسیار کم برای انسان لازم هستند (نیکل، کروم، مس و کبالت)، در حالی که بقیه سرطان زا یا سمی بوده و یا بر سیستم اعصاب مرکزی (جیوه، آرسنیک و سرب)، کلیه‌ها و کبد (مس، کادمیوم، سرب و جیوه)، پوست، استخوان و یا دندان‌ها (کادمیوم، کروم و نیکل) آسیب می‌رسانند [۴]. تشخیص و تصفیه آلودگی مستلزم پایش، تعیین توزیع فضایی، غلظت و ویژگی‌های آلودگی بر اساس نمونه‌گیری‌های منظم و آنالیزهای آزمایشگاهی و بررسی پیوسته محیط با روش‌های درون‌یابی زمین آماری [۵-۶] بوده که بسیار وقت گیر و پرهزینه است و تنها اطلاعات محدودی راجع به نقطه و زمانی خاص را به ما می‌دهد. علاوه بر این با گذر زمان تغییرات بسیاری در الگوی پراکندگی و غلظت این مواد به وجود می‌آید [۷].

یکی از فناوری‌هایی که پتانسیل بالایی در جایگزینی روش‌های نمونه برداری و آنالیز مرسوم داشته و بدون تماس و بسیار کم هزینه اجرا می‌گردد، سنجش از دور است. در این مقاله برخی از مهمترین مطالعاتی که پیرامون پایش گسترش فلزات سمی با کمک سنجش از دور زمینی و فرا زمینی صورت گرفته است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بحث و روش تحقیق:

سنجش از دور و پایش توزیع فلزات سمی

سنجش از دور دانشی است که با اندازه‌گیری از فاصله دور و بدون تماس فیزیکی، اطلاعات ارزنده ای را نسبت به اشیاء و پدیده‌های زمین ارائه می‌دهد و به دو گروه سنجش از دور زمینی (طیفی) و فضایی تقسیم می‌گردد. در دور سنجی،

² Electroplating

اطلاعات از طریق اندازه گیری و ثبت انعکاس امواج الکترو مغناطیس که به اجسام برخورد می کنند دریافت و پس از تجزیه و تحلیل، نتایج لازم استخراج می شود. در این روش از ابزارها و شیوه هایی مانند لیدار^۳، رادار، تکنولوژی اشعه ایکس و ابزارهای صوتی استفاده می گردد، با این حال در بسیاری موارد قسمتی از- طول موج بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر- طیف الکترومغناطیس که توسط اشیاء منعکس گردیده مطالعه می شود. در برخورد امواج الکترومغناطیس با هر پدیده سه عمل انعکاس، جذب و عبور صورت می گیرد که میزان هر یک به طول موج انرژی تابیده و نیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن پدیده بستگی دارد. اگر انعکاس امواج از اجسام به صورت نمودار نشان داده شوند در اصطلاح منحنی بازتاب طیفی به دست می آید که از طریق آن می توان ویژگی های طیفی را بررسی نمود. دورسنجی سابقه طولانی در تأمین اطلاعات حیاتی به منظور شناخت، خصوصیت سنجی و حذف آلودگی های زیست محیطی دارد [۸]. از جمله مهمترین این آلودگی ها فلزات سمی هستند که باید به صورت پیوسته مورد پایش قرار گیرند.

سنجش از دور زمینی (طیف سنجی)

ابزار اساسی مطالعات سنجش از دور که با توسعه ابزارهای جدید، به طور فزاینده ای مورد استفاده قرار گرفته طیف سنجی است. طیف سنجی علم اندازه گیری واکنش انرژی با ماده بوده و به طور گسترده ای در شیمی و ستاره شناسی به منظور شناخت مواد مورد استفاده قرار می گیرد. در تحقیقات ابتدایی تأثیر فلزات سمی بر طیف بازتابی گیاهان بررسی و در پی جویی های معدنی و و پایش آلودگی های زیست محیطی استفاده گردیده اند [۹-۱۰].

اسپکترومتر، اسپکتروفتومتر، اسپکتروگراف یا اسپکترورادایومتر همگی نام های متفاوت برای ابزارهایی هستند که از نوعی منشور یا وسیله الکترو-اپتیکی به منظور تجزیه نور به اجزای جداگانه با طول موج های متفاوت استفاده نموده و میزان انعکاس و جذب آن طول موج ها را از یک سطح هدف اندازه می گیرند.

در مقایسه با روش های سنتی، طیف سنجی مزایای متعددی دارد که از آن جمله می توان به ارزان و غیر مخرب بودن، اندازه گیری سریع و مکرر، اندازه گیری بسیاری از خصوصیات با یک آزمایش، قابلیت اجرا در دو محیط آزمایشگاهی و میدانی، پیوسته بودن نتیجه روش از نظر فضایی و زمانی و عدم احتیاج به مواد و واکنشگرهای شیمیایی مضر که خود تهدیدی برای محیط زیست به شمار می روند، اشاره کرد [۱۱].

میزان جذب خاک در محدوده طیفی مرئی/مادون قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰ nm)، عموماً به حضور اکسیدهای آهن، کانی های رسی، آب و مواد آلی وابسته است [۱۲]. بسیاری از اکسیدهای آهن در خاک- مانند گوتیت- در محدوده طیف مرئی (۲۵۰-۷۸۰ nm) و مادون قرمز طول موج کوتاه و نزدیک (۷۸۰-۱۰۰۰ nm) دارای خصوصیات جذبی می باشند [۱۳]. کانی های رسی نیز به دلیل حضور OH، H₂O، CO₃، در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک طول موج بلند (۲۵۰۰-۱۱۰۰ nm) برخی خصوصیات طیفی شاخص دارند [۱۴].

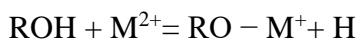
بعضی از عناصر واسطه (مانند نیکل، مس، کبالت و کروم) در دو صورت می توانند در محدوده طیفی مرئی/مادون قرمز نزدیک خصوصیات انعکاسی نشان دهند: ۱- غلظت آن ها بسیار بالا باشد (بالتر از ۴۰۰۰ mg.kg⁻¹) و ۲- در لایه اورتالی d غیر اشباع باشند [۱۵]. دلیل این موضوع این است که وقتی اتم یک عنصر واسطه در شرایط خاصی قرار می گیرد، سطح انرژی اورتالی های d با انتقال یک الکترون از سطح پایین تر به سطح بالاتر شکسته می شود و بنابراین انرژی الکترومغناطیس جذب می گردد [۱۴].

در غلظت های بالاتر از ۱۴۰۰۰ mg.kg⁻¹ کروم و مس در طول موج های ۶۱۰ و ۸۳۰ نانومتر دارای خصوصیات طیفی هستند. با این حال این غلظت بالای فلزات سمی تنها در مناطق به شدت آلوده معدنی و صنعتی رخ داده و در بسیاری مناطق مقادیر غلظت در حدود بسیار پایین قرار دارد. در صورت پایین بودن غلظت فلزات سمی موجود در خاک، آن ها مشخصه طیفی در محدوده مرئی/مادون قرمز نزدیک نداشته و این به این معناست که سنجش مستقیم غلظتشان در خاک با استفاده از ویژگی های طیفی خاک بسیار سخت است [۱۴].

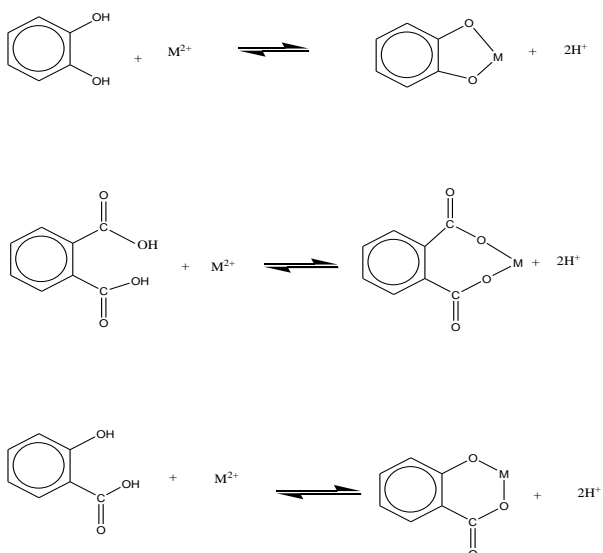
³ LiDAR (Light Detection And Ranging)

اگرچه فلزات سمی موجود در خاک -با غلظت های متوسط تا پایین- فاقد ویژگی طیفی هستند، اما به راحتی می توانند به اکسیدهای آهن، رس ها و مواد آلی متصل شوند [۱۵]. کاتیون های فلزی (M^+) بر سطوح هیدروکسیل ROH (که R می تواند Al, Fe, Mn, Si و... در سطوح کانی ها باشد) به طریق زیرجذب می گردند:

(۱)



در نتیجه، افزایش کاتیون های فلزات سمی باعث کاهش در میزان ROH و افزایش RO (مانند اکسیدهای آهن) در سطوح کانی های رسی و اکسیدها می گردد [۱۶،۱۷]. علاوه بر این فلزات سمی با مواد آلی خاک ترکیب شده و کمپلکس های فلزی را تشکیل می دهند (شکل ۱). بنابراین غلظت فلزات سمی موجود در خاک ارتباط نزدیکی با غلظت رس ها، اکسیدهای آهن و مواد آلی خاک دارد (ارتباط بین فلزات سمی و مواد آلی خاک به تفصیل در مرجع ۱۸ آمده است) [۱۸]. بنابراین با استفاده از ارتباطی که بین فلزات سمی موجود در خاک با ویژگی های طیفی آن وجود دارد، غلظت فلزات سمی را می توان تخمین زد [۲۰-۲۲]. مکانیزم غیر مستقیم تخمین غلظت فلزات سمی به خوبی توسط لیو و همکارانش مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. در مطالعه آن ها در ابتدا مدلی به منظور تخمین مقدار مواد آلی خاک با استفاده از داده های طیفی ایجاد گردید. سپس مدل دوم ارتباط بین غلظت فلزات سمی و مواد آلی خاک را معین ساخت. در نهایت از ترکیب دو مدل مذکور، غلظت فلزات سمی با استفاده از اطلاعات طیفی خاک تعیین گردید. پس از آن، در مطالعات بسیاری به منظور جایگزین نمودن روش اندازه گیری مستقیم غلظت فلزات سمی با استفاده از خصوصیات طیفی آن ها، ارتباط بین فلزات سمی و اکسیدهای آهن [۱۵،۲۲،۲۳،۲۴]، مواد آلی [۲۰،۲۵]، و یا کانی های رسی [۱۵،۲۰،۲۶،۲۷،۲۸] موجود در خاک مورد بررسی قرار گرفت. با این حال از میان عواملی همچون مواد آلی، اکسیدهای آهن و کانی های رسی، عاملی که نقش پل ارتباط دهنده فلزات سمی و طیف انعکاسی را ایفا می نماید، کاملاً وابسته به موقعیت بوده و از یک منطقه به منطقه دیگر فرق می کند. این بدان معناست که مکانیزم تخمین غلظت فلزات سمی با استفاده از ویژگی های طیفی خاک امکان دارد در مناطق مختلف متفاوت باشد.



شکل ۱- واکنش های تشکیل کمپلکس متفاوت بین کاتیون های فلزی و مواد آلی خاک [۱۹]

سنجش از دور فرازمینی

با استفاده از دورسنجی می توان مناطق وسیعی را مورد پایش قرار داده و تصاویر متعدد با فواصل معین تهیه نمود و تغییرات زمینی را به طور پیوسته و روتین و با هزینه کم ثبت کرد. از این رو می توان از سنجش از دور هوایی/فضایی به عنوان ابزاری مهم و متعارف در تحلیل مسایل مربوط به محیط زیست- از جمله پایش های زیست محیطی- بهره برد.

بر خلاف روش های اندازه گیری برجا، سنجش از دور توانایی بالایی در فراهم آوردن نماهای مختلف در زمان های مختلف از پارامترهای زیست محیطی دارد. از این رو سنجش از دور فضایی یک روش کم هزینه به منظور ترسیم و پایش تغییرات محیطی مناطق وسیع به کمک سری های زمانی از تصاویر ماهواره ای است. تحقیقات علمی در مقیاس های محلی و منطقه ای را با استفاده تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک فضایی متوسط تا بالا می توان آسان تر انجام داد. حسگرهای فراطیفی قدرت ایجاد تصاویری با قدرت تفکیک طیفی بالا- که می توانند در بررسی دقیق شرایط زیست محیطی موثر باشند- را دارند. همچنین تصویربرداری با تفکیک زمانی بالا نیز به منظور بررسی های تغییرات زمانی مورد استفاده قرار می گیرند. در دورسنجی، اطلاعات از طریق اندازه گیری و ثبت انعکاس امواج الکترومغناطیس جو و سطح به وسیله سنجنده ای که بر روی ماهواره ها تعبیه شده - بر اساس منبع انرژی به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم می شوند- دریافت و پس از تجزیه و تحلیل قرار دادن، اطلاعات لازم استخراج می شود. فرایند ثبت و پردازش تصاویر دورسنجی بر اساس مراحل جمع آوری و ثبت و پردازش تا ارائه اطلاعات قابل استفاده کاربران، به دو روش عکسبرداری و جاروب کردن می باشد.

برخی از مطالعات انجام شده

فلزات سمی با توجه به قرار گرفتن در طبقه بندی مواد زاید خطرناک، موضوع بسیاری از مطالعات سنجش از دور بوده اند. فلزات سمی همچون کادمیوم، سرب، سلنیوم، آرسنیک و روی معمولاً به عنوان اولین آلاینده های مکان های تجمع باطله های خطرناک شناخته شده [۲۹] و تشخیص و ترسیم آن ها یکی از مهمترین کاربردهای سنجش از دور است. اولین مطالعه که تخمین صحیح غلظت فلزات سمی موجود در خاک را با استفاده از VNIRS^۴ گزارش نمود در سال ۱۹۹۷ منتشر شد [۲۵]. با این حال کاربرد های موفقیت آمیز این تکنیک در مطالعات متأخر گزارش شده است که در آن ها با استفاده از روش های آماری-رگرسیون مانند کمترین مربعات جزئی چندگانه MPLS^۵ و کمترین مربعات جزئی PLSR^۶ ارتباط بین وضعیت طیفی خاک و غلظت فلزات سمی بررسی شده است. نمونه ای از این مطالعات در جدول ۱ آمده است. چوئی^۷ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ پارامترهای طیفی خاک آلوده به یون های فلز سمی را در یک منطقه استخراج نموده و امکان استفاده از این پارامترها را در تصاویر فراطیفی هایمپ^۸ گرفته شده از همان منطقه و ترسیم نقشه توزیع فلزات سمی را مورد بررسی قرار دادند. نسبت بانندی ۶۱۰ به ۵۰۰ نانومتر (R_{610,50}) در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک، منطقه جذبی در ۲۲۰۰ نانومتر (Area₂₂₀₀) و همچنین تقارن ویژگی طیفی در ۲۲۰۰ نانومتر (Asym₂₂₀₀) به ترتیب همبستگی خوبی با غلظت های سرب، روی و آرسنیک نشان دادند. نقشه های گرادسانی حاصل از پارامترهای طیفی، الگوی فضایی مشابهی با نقشه های گرادسانی ژئوشیمیایی نشان دادند. همچنین به منظور بررسی کاربرد ویژگی های طیفی استخراج شده بر روی تصاویر هایمپ، ویژگی های استخراج شده از تصاویر با ویژگی های طیفی حاصل از برداشت های میدانی مرحله قبل مقایسه گردیدند. R_{1344,773} و Area₂₂₀₀ حاصل از دو روش طیفی با یکدیگر همبستگی پایینی داشتند در حالی که مقادیر پارامترهایی همچون عمق طیف در طول موج ۵۰۰ نانومتر (Depth₅₀₀)، R_{1344,778} و Area₂₂₀₀ به دست آمده از پیکسل های تصویر با مقادیر همان پارامترهای به دست آمده از اندازه گیری های میدانی، قابل مقایسه بود. نتایج مطالعه نشان داد که با توسعه پارامترهای طیفی استخراج شده به تصاویر هایمپ می توان الگوی توزیع فلزات سمی را ترسیم نمود. آن ها همچنین مطالعات بیشتری به منظور برطرف کردن تفاوت بین تفکیک طیفی و مکانی بین طیف حاصل از برداشت میدانی و تصویر هوایی را لازم دانستند [۱۶].

⁴ Visible and Near Infrared

⁵ Multiple Partial Least Square

⁶ Partial Least Square Regression

⁷ Choe

⁸ Hymap

و^۹ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ سه نمونه خاک آلوده را با روش های آنالیز شیمیایی و طیف سنجی انعکاسی مورد بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که فلزاتی که همبستگی بیشتری با آهن دارند - در هر کدام از نمونه ها این فلزات متفاوت بودند - صحت پیش بینی بالاتری دارند در حالی که فلزاتی که همبستگی کمتری با آهن دارند دارای کمترین صحت پیش بینی در بین سایر عناصر بودند. لذا براساس یافته های آن ها، ارتباطات بین-یون های فلزی و بررسی تأثیر آن ها بر یکدیگر می تواند موضوع جالبی برای پژوهش در این زمینه باشد [۳۰].

همبستگی بین ۶ عنصر سمی کروم، مس، کادمیوم، سرب، جیوه و آرسنیک و طیف انعکاسی خاک آلوده به این عناصر در محدوده طیفی VNIR و مادون قرمز میانه^{۱۰} MIR توسط سانگ^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس الگوهای همبستگی حاصل ۶ عنصر سمی مورد مطالعه به دو گروه تقسیم گردیدند: ۱- Cr، As و عناصر مذکور با این تشکیل دهنده های خاک می باشد. ۲- گروه دوم که شامل Cd، Pb و Hg می باشد تنها همبستگی معنادار با محدوده طیفی مرتبط با مواد آلی نشان Cu که ضریب همبستگی منفی قوی با ویژگی های جذبی مرتبط با باندهای طیفی اکسیدهای آهن، رس ها و مواد آلی داشته و این موضوع نشان دهنده اتصال قوی می دهد و این موضوع بیانگر اتصال این فلزات به مواد آلی موجود در خاک است.

جدول ۱- منتخبی از مطالعات انجام شده به منظور تخمین غلظت فلزات سمی با استفاده از طیف سنجی مرئی و مادون قرمز نزدیک

مرجع	تعداد نمونه ها	R ²	روش رگرسیون	(mg/ kg) غلظت	محل نمونه برداری	فلز
[۳۲]	120	0.65	PLSR	5.57-47.07	حومه شهرها	As
[۳۱]	122	0.455	PLSR	3.800-16.600	دلته	As
[۳۳]	117	0.92	PLSR	0.6-220	رسوبات رودخانه	As
[۲۶]	29	0.372, 0.598	SMLR, EMLR ^{۱۲}	52.4-1493.8	معادن متروکه	As
[۳۱]	122	0.302	PLSR	0.081-1.441	دلته	Cd
[۲۰]	69	0.88	PLSR	-	دشت سیلابی نزدیک معادن	Cd
[۲۵]	169	0.629	PLSR	-	رسوبات دریاچه	Cd
[۳۲]	120	0.76	PLSR	28.70-105.00	حومه شهرها	Cr
[۳۳]	117	0.66	PLSR	5-175	رسوبات رودخانه	Cr
[۳۱]	122	0.988	PLSR	30.99-113.9	دلته	Cr
[۳۲]	120	0.62	PLSR	9.60-73.40	حومه شهرها	Cu
[۳۱]	122	0.924	PLSR	9.100-55.500	دلته	Cu

⁹ Wu

¹⁰ Mid Infrared

¹¹ Song

¹² Enter Multiple Linear Regression

Cu	رسوبات رودخانه	15-575	PLSR	0.72	117	[۳۳]
Cu	رسوبات دریاچه	-	PLSR	0.906	169	[۲۵]
Hg	دلتا	0.030-0.330	PLSR	0.832	122	[۳۱]
Hg	دلتا	0.04-1.26	PCR	0.71	105	[۲۲]
Hg	حومه شهرها	0.04-1.26	PLSR	0.59	120	[۳۲]
Ni	حومه شهرها	10.60-57.50	PLSR	0.86	120	[۳۲]
Ni	رسوبات دریاچه	-	PLSR	0.876	169	[۲۵]
Ni	رسوبات رودخانه	3.3-320	PLSR	Poorly	117	[۳۳]
Pb	دلتا	11.12-89.68	PLSR	0.681	122	[۳۱]
Pb	حومه شهرها	22.30-208	PLSR	0.66	120	[۳۲]
Pb	رسوبات دریاچه	-	PLSR	0.814	169	[۲۵]
Pb	رسوبات رودخانه	21-445	PLSR	0.32	117	[۳۳]
Pb	دشت سیلابی	2.480-50.920	UR	0.66	30	[۲۳]
Pb	معادن متروکه	56.8-152.5	SMLR,EMLR	-, 0.275	29	[۲۶]
Zn	دشت سیلابی	-	PLSR	0.9	69	[۲۰]
Zn	دشت سیلابی	73.76-269.53	UR ^{۱۳}	0.79	30	[۲۳]
Zn	رسوبات دریاچه	-	PLSR	0.927	169	[۲۵]
Zn	رسوبات رودخانه	40-2060	PLSR	0.59	117	[۳۳]
Zn	حومه شهرها	43.90-625.00	PLSR	0.62	120	[۳۲]

بر اساس نتیجه گیری نویسندگان، روش های رگرسیون تک متغیره و PLS برای طیف VNIR قابلیت پیش بینی بهتری را در مقایسه با طیف MIR نشان داده و بنابراین برای تخمین میزان فلزات سمی در خاک کشاورزی مناسب تر می باشد [۳۱].

در سال ۲۰۰۵، وو و همکارانش یک روش سریع به منظور بررسی غلظت جیوه در خاک های کشاورزی منطقه نانچینگ با استفاده از طیف انعکاسی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک پیشنهاد دادند. به منظور بالا بردن صحت پیش بینی، پیش پردازش های مختلف بر روی داده های طیفی انجام و در نهایت از روش های رگرسیون مؤلفه اصلی^{۱۴} و تک متغیره برای تخمین غلظت جیوه استفاده گردید. مدل بهینه با استفاده از روش PCR به دست آمد ($R=0.69$). مقایسه سه محدوده طیفی ($0.38-2.5\mu\text{m}$ ، $0.38-1.1\mu\text{m}$ و $0.38-1.1\mu\text{m}$) نشان داد که بهترین نتایج در محدوده $1-2.5\mu\text{m}$ به دست می آید. آنالیز همبستگی نیز نشان داد که غلظت جیوه با انعکاس خاک همبستگی منفی داشته در حالی که با عمق جذب گوتیت در طول موج 0.496 میکرومتر و کانی های رسی در 2.1 میکرومتر دارای همبستگی مثبت می باشد. این موضوع نشان دهنده این است که جذب جیوه به وسیله کانی های رسی صورت گرفته و لذا تغییرات طیفی آن ها به پیش بینی غلظت فلز جیوه که فاقد خصوصیات طیفی است کمک می نماید [۳۴].

¹³ Univariate Regression

¹⁴ Principal component analysis

سانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با تحلیل طیفی نمونه های برداشت شده از خاک و آب منطقه معدنی وان-شنگ خصوصیات منحصر به فرد آن ها را استخراج نموده و با استفاده از روش روش رگرسیون خطی چندگانه گام به گام^{۱۵}، SMLR مدلی بین این شاخصه های طیفی و محتوای Al، Cu و Cr خاک و آب تعیین نمودند. آن ها در ادامه نقشه گرادانی غلظت سه فلز مذکور را با استفاده از روش معکوس مسافت وزن دار تعیین نمودند. نتایج حاصل نشان داد که می توان فلزات سمی موجود در خاک و رودخانه را که ناشی از فعالیت های معدنی هستند، با استفاده از روش سریع و کم هزینه طیف سنجی تخمین زد [۳۵].

علاوه بر بررسی طیفی نمونه های خاک و همچنین تصاویر مربوط به خاک منطقه آلوده، سنجش از دور می تواند به عنوان ابزاری برای بررسی ترکیب و وضعیت گیاهانی که در منطقه روییده اند استفاده گردد. نتایج حاصل از این بررسی در تفسیر وضعیت کانی شناسی و همچنین محتوای فلزی خاک محل رشد گیاهان مورد استفاده قرار می گیرد. وجود ارتباط بین پوشش گیاهی، خاک و نهشته های معدنی زیر آن، بارها توسط محققان مورد تأکید قرار گرفته است [۳۶].

کوئیسترا^{۱۶} در سال ۲۰۰۳ همین سال مطالعه ای را انجام داد تا بر اساس آن امکان ارزیابی خصوصیات طیفی خاک موجود در دشت های سیلابی را - به صورت در جا- و با استفاده از طیف سنجی انعکاسی میدانی پوشش گیاهی بررسی نماید. نتایج نشان داد که ترکیبی از طیف سنجی میدانی و کالیبراسیون چند متغیره یک رابطه کمی بین مواد آلی و محتوای رس نتیجه می دهد. این مطالعه پتانسیل روش های چند متغیره برای ترسیم خصوصیات خاک با استفاده از تصاویر اچ آر اس HRS را اثبات می نماید. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که استفاده از اطلاعات طیفی جزئی برای طبقه بندی رسوبات موجود در دشت های سیلابی رودخانه بسیار مفید می باشد. آن ها از روش رگرسیون کمترین مربعات جزئی برای اثبات ارتباط بین طیف انعکاسی خاک- که در شرایط میدانی اندازه گیری شده است- و محتوای مواد آلی و رس خاک استفاده نمودند. بر اساس یافته های این تحقیق، اگر چه پاسخ به دست آمده از طیف اندازه گیری شده در محل به درستی آنالیزهای فیزیکی- شیمیایی نیست، نتیجه حاصل برای خصوصیت سنجی سریع خاک و کاربردهای سنجش از دور مفید می باشد [۳۷].

همچنین در سال ۲۰۰۴ کوئیسترا مطالعه دیگری به منظور بررسی ارتباط انعکاس گیاهان و غلظت فلزاتی همچون نیکل، کروم، مس و سرب در خاک دشت های سیلابی در طول رودخانه های راین و میوز در هلند انجام داد. در مطالعه مذکور طیف انعکاسی مرئی و مادون قرمز نزدیک با تفکیک بالا از گیاهان با استفاده از یک رادیومتر میدانی تهیه شد. دو اندیس گیاهی شاخص تفاوت گیاهی^{۱۷} DVI و موقعیت لبه قرمز^{۱۸} REP به همراه روابط رگرسیونی با استفاده از رگرسیون خطی ساده محاسبه گردیدند. نتایج مطالعه، توانایی سنجش از دور را در پایش آلودگی های خاک دشت های سیلابی موجود در زیر پوشش گیاهی، با استفاده از پاسخ طیفی آن ها به اثبات رساند. مدل سازی رابطه بین آلودگی خاک و پاسخ طیفی گیاهان، نتایج مشابهی را برای DVI و REP و همچنین رویکرد تحلیل چند متغیره با استفاده از رگرسیون PLS نشان داد [۳۸].

مطالعات مشابهی توسط کلورس^{۱۹} و همکارانش در دشت های سیلابی آلوده در هلند انجام گردید. تحلیل اندازه گیری های میدانی طیفی-رادیومتریکی آشکار ساخت که REP و مشتق اول بهترین پیش بینی کننده های آلودگی فلزات سمی هستند [۳۹، ۴۰]. همچنین اسلونکر^{۲۰} توانست با موفقیت آرسنیک موجود در خاک را با استفاده از خصوصیات طیفی پوشش چمن موجود در یک محیط آلوده شهری ترسیم نماید [۴۱].

¹⁵ Stepwise Multiple Linear Regression

¹⁶ Kooistra

¹⁷ Difference Vegetation Index

¹⁸ Red-Edge Position

¹⁹ Cleverse

²⁰ Slonecker

نتیجه گیری

با توجه به پیشرفت روز افزون تصویر برداری فراطیفی و افزایش تفکیک پذیری طیفی/مکانی و همچنین امکان استفاده از دستگاه های طیف سنج پیشرفته، پیشنهاد می گردد مطالعات بیشتری بر رفتار طیفی خاک آلوده به غلظت های مختلف فلزات سمی انجام گرفته و همچنین با پردازش تصاویر هوایی/ فضایی، الگوی پراکندگی آن ها در خاک و آب بررسی گردد.

منابع و مراجع

- [1] Volesky, B., Biosorption and me, Water research, 41, 2007, pp. 4017-4029 .
- [2] Sud, D., Mahajan, G., Kaur, M.P., Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions—A review, Bioresource technology, 99, 2008, pp. 6017-6027.
- [3] Volesky, B., Removal and recovery of heavy metals by biosorption”, 1st Ed., CRC Press, USA, 1990 .
- [4] [www.wikipedia.net/ Heavy metals](http://www.wikipedia.net/Heavy%20metals), [Online] .
- [5] Leenaers, H., Okx, J.P., Burrough, P.A., Employing elevation data for efficient mapping of soil pollution on floodplains”, Soil use and management, 6, 1990, pp.105-114.
- [6] Von Steiger, B., Webster, R., Schulin, R., Lehmann, R., Mapping heavy metals in polluted soil by disjunctive kriging, Environmental Pollution, 94, 1996, pp.205-215 .
- [7] Liu, Y., Li, W., Wu, G., Xu, X., 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, 2011, pp.10-16 .
- [8] Lyon, J.G., Use of maps, aerial photographs, and other remote sensor data for practical evaluations of hazardous waste sites, Photogramm. Eng. Remote Sensing, 53, 1987.
- [9] Collins, W., Chang, S.H., Raines, G.L., Canney, F., Ashley, R., Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits, Economic Geology, 78, 1983, pp.737-749 .
- [10] Milton, N.M., Ager, C.M., Eiswerth, B.A., Power, M.S., Arsenic-and selenium-induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants, Remote Sensing of Environment, 30, 1989, pp.263-269.
- [11] Rossel, R.V., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, Geoderma, 131, 2006, pp. 59-75 .
- [12] Rossel, R.V., Behrens, T., Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra, Geoderma, 158, 2010, pp. 46-54.
- [13] Torrent, J., Barrón, V., Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides, Encyclopedia of Surface and Colloid Science, 2002, pp. 1438-1446 .
- [14] Clark, R. N., Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, Manual of remote sensing, 3, 1999, pp. 3-58.
- [15] Wu, Y., Chen, J., Ji, J., Gong, P., Liao, Q., Tian, Q., Ma, H., A mechanism study of reflectance spectroscopy for investigating heavy metals in soils, Soil Science Society of America Journal, 71, 2007, pp. 918-926 .
- [16] Choe, E., van der Meer, F., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Smeth, B., Kim, K.W., 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, 2008, pp. 3222-3233 .
- [17] Rathod, P.H., Rossiter, D.G., Noomen, M.F., van der Meer, F.D., Proximal spectral sensing to monitor phytoremediation of metal-contaminated soils, International journal of phytoremediation, 15, 2013, pp. 405-426 .
- [18] Kabata-Pendias, A., Trace elements in soils and plants, 4th Ed., Taylor & Francis, UK, 2010 .

- [19] Piccolo, A., Stevenson, F.J., Infrared spectra of Cu^{2+} Pb^{2+} and Ca^{2+} complexes of soil humic substances, *Geoderma*, 27, 1982, pp. 195-208 .
- [20] Kooistra, L., Wehrens, R., Leuven, R.S.E.W., Buydens, L.M.C., Possibilities of visible–near-infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains, *Analytica Chimica Acta*, 446, 2001, pp. 97-105 .
- [21] Xueguang, S., Yu, N., Fengxia, L., Jihui, L., Wensheng, C., Application of near-infrared spectroscopy in micro inorganic analysis, *Acta Chimica Sinica*, 70, 2012, pp. 2109-2114 .
- [22] Wu, Y.Z., Chen, J., Ji, J.F., Tian, Q.J., Wu, X.M., Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination, *Environmental science & technology*, 39, 2005, pp. 873-878 .
- [23] Vohland, M., Bossung, C., Fründ, H.C., A spectroscopic approach to assess trace–heavy metal contents in contaminated floodplain soils via spectrally active soil components, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 2009, pp. 201-209.
- [24] Kemper, T., Sommer, S., Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy, *Environmental Science & Technology*, 36, 2002, pp. 2742-2747 .
- [25] Malley, D.F., Williams, P.C., Use of near-infrared reflectance spectroscopy in prediction of heavy metals in freshwater sediment by their association with organic matter, *Environmental Science & Technology*, 31, 1997, pp. 3461-3467 .
- [26] Choe, E., Kim, K.W., Bang, S., Yoon, I.H., Lee, K.Y., Qualitative analysis and mapping of heavy metals in an abandoned Au–Ag mine area using NIR spectroscopy, *Environmental geology*, 58, 2009, pp. 477-482 .
- [27] Madejova, J.; & Komadel, P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods, *Clays and clay minerals*, 49(5), 2001, 410-432 .
- [28] Xia, X.Q., Mao, Y.Q., Ji, J.F., Ma, H.R., Chen, J., Liao, Q.L., Reflectance spectroscopy study of Cd contamination in the sediments of the Changjiang River, China, *Environmental science & technology*, 41, 2007, pp. 3449-3454 .
- [29] Titus, S. E., Survey and analysis of present or potential environmental impact sites in Woburn, Massachusetts, American Congress on Surveying and Mapping and American Society of Photogrammetry Convention, Hollywood, Florida, USA, 1982 .
- [30] Wu, Y., Zhang, X., Liao, Q., Ji, J., Can contaminant elements in soils be assessed by remote sensing technology: a case study with simulated data, *Soil Science*, 176, 2011, pp. 196-205 .
- [31] Song, Y., Li, F., Yang, Z., Ayoko, G.A., Frost, R.L., Ji, J., Diffuse reflectance spectroscopy for monitoring potentially toxic elements in the agricultural soils of Changjiang River Delta, China, *Applied Clay Science*, 64, 2012, pp. 75-83 .
- [32] Wu, Y., Chen, J., Wu, X., Tian, Q., Ji, J., Qin, Z., Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils, *Applied Geochemistry*, 20, 2005, pp. 1051-1059 .
- [33] Moros, J., Vallejuelo, S.F.O.D., Gredilla, A., Diego, A.D., Madariaga, J.M., Garrigues, S., Guardia, M.D.L., Use of reflectance infrared spectroscopy for monitoring the metal content of the estuarine sediments of the Nerbioi-Ibaizabal River (Metropolitan Bilbao, Bay of Biscay, Basque Country), *Environmental science & technology*, 43, 2009, pp. 9314-9320.

- [34] Wu, Y.Z., Chen, J., Ji, J.F., Tian, Q.J., Wu, X.M., Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination, *Environmental science & technology*, 39, 2005, pp. 873-878.
- [35] Song, L., Jian, J., Tan, D.J., Xie, H.B., Luo, Z.F., Gao, B., Estimate of heavy metals in soil and streams using combined geochemistry and field spectroscopy in Wan-sheng mining area, Chongqing, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 2015, pp. 1-9.
- [36] Milton, N.M., Eiswerth, B.A., Ager, C.M., Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants, *Remote sensing of environment*, 36, 1991, pp. 121-127 .
- [37] Kooistra, L., Wanders, J., Epema, G.F., Leuven, R.S.E.W., Wehrens, R., Buydens, L.M.C., The potential of field spectroscopy for the assessment of sediment properties in river floodplains, *Analytica Chimica Acta*, 484, 2003, pp. 189-200 .
- [38] Kooistra, L., Salas, E.A.L., Clevers, J.G.P.W., Wehrens, R., Leuven, R.S.E.W., Nienhuis, P.H., Buydens, L.M.C., Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains, *Environmental Pollution*, 127, 2004, pp. 281-290 .
- [39] Clevers, J.G.P.W., Kooistra, L., Salas, E.A.L., Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data, *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2004, pp. 3883-3895 .
- [40] Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., Assessment of heavy metal contamination in river floodplains by using the red-edge index. *Chemical analysis, The 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Hirsching, Germany, 2003 .*
- [41] Slonecker, E., *Remote Sensing Investigations of Fugitive Soil Arsenic and Its Effects on Vegetation Reflectance*, Ph.D. Dissertation, George Mason University, Fairfax, VA, USA, 2007.