

بررسی کانی‌های زهاب اسیدی با استفاده از ویژگی‌های طیفی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مطالعه موردی: معدن دره‌زار، استان کرمان)

عالیه سیفی^۱، مهدیه حسینجانی‌زاده^{۲*}، حجت‌اله رنجبر^۳، مهدی هنرمند^۴

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد، سنجش از دور زمین‌شناختی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
seifi.aliyeh@gmail.com

۲. استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۳. استاد، گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
hojjatranjbar@gmail.com

۴. استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
mehonarmand167@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۲۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۸/۲۶

چکیده

زهاب اسیدی آثار مخربی بر محیط‌زیست دارد. معدن دره‌زار یکی از معادن مس پورفیری است که دگرسانی فیلیک در آن گسترش قابل توجهی دارد و کانی پیریت (سولفید آهن) در این دگرسانی جزو کانی‌های باطله با قابلیت تشکیل زهاب اسیدی است. در این تحقیق، کانی‌های ثانویه آهن مرتبط با زهاب اسیدی در معدن دره‌زار با استفاده از بررسی ویژگی‌های طیفی کانی‌ها و پردازش تصاویر لندست ۸ مطالعه و بارزسازی شد. به‌منظور شناسایی ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص زهاب اسیدی از طیف‌های کتابخانه طیفی USGS و برای بارزسازی مناطق دارای پتانسیل زهاب اسیدی با تصویر لندست ۸ از روش آنالیز مؤلفه اصلی استفاده شده است. نتایج نشان داد که با مطالعات طیفی و روش‌های پردازش تصویری مانند آنالیز مؤلفه اصلی امکان شناسایی کانی‌های زهاب اسیدی وجود دارد. با مطالعات میدانی حضور کانی‌های ثانویه آهن در دامپ‌های شرقی، غربی و بخش مرکزی توده معدنی تأیید شد. در مطالعات طیف‌سنجی نمونه‌های صحرایی نیز کانی‌های ثانویه آهن مانند گوتیت، ژاروسیت و هماتیت شناسایی شد. اندازه‌گیری pH و EC وجود آب‌های با pH پایین و EC بالا را در محدوده داخل معدن نشان داد که در مجموع مطالعات میدانی و آزمایشگاهی با نتایج پردازش تصویر هماهنگ بود.

کلیدواژه

پردازش تصویر، دره‌زار، زهاب اسیدی، لندست ۸، ویژگی طیفی.

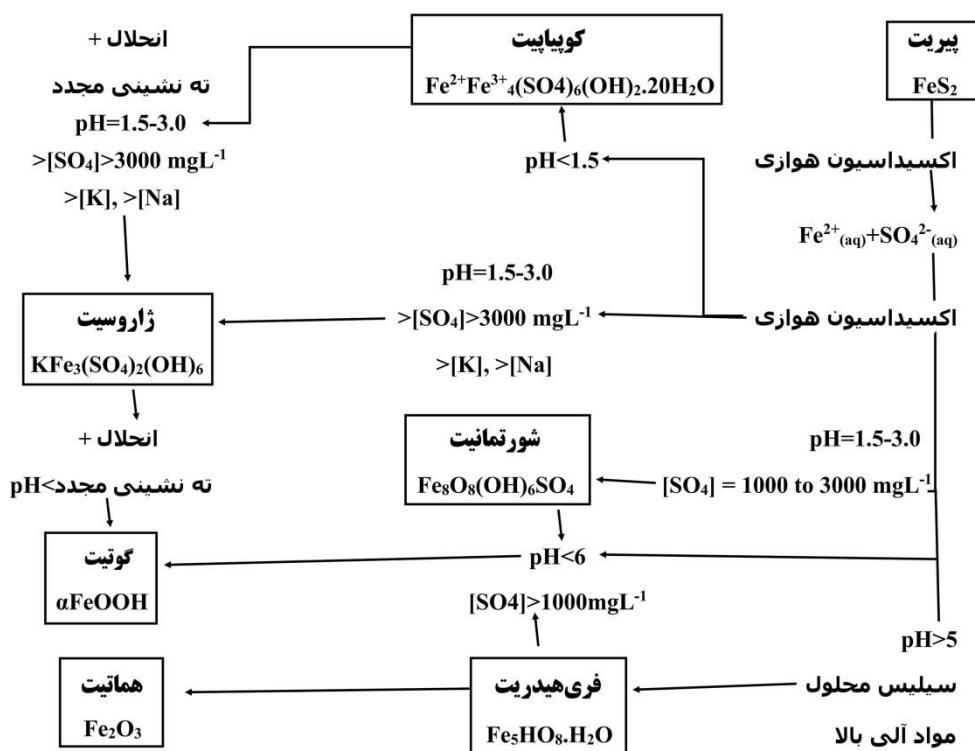
۱. سرآغاز

شورتمانیت $(Fe_3(OH)_6(SO_4)_2 \cdot 20(H_2O))$ ، ژاروسیت $(KFe_3(OH)_6(SO_4)_2)$ ، گوتیت $(Fe^{3+}_{16}O_{16}(OH)_{12}(SO_4)_2)$ ، فری‌هیدریت $(Fe_5HO_8 \cdot H_2O)$ ، لپیدوکروزیت $(FeO(OH))$ و هماتیت (Fe_2O_3) است که با افزایش pH (به‌ترتیب از خیلی اسیدی تا خنثی) در مناطق دارای آلودگی زهاب اسیدی مشاهده می‌شود.
بر اساس مدل Montero و همکاران (۲۰۰۵) در

در مناطق معدنی اکسایش سولفید آهن سریع و در حد وسیع انجام می‌شود و گاهی زهاب اسیدی را به‌وجود می‌آورد. زهاب اسیدی از قرارگرفتن سولفیدهای فلزی (عمدتاً آهن) در معرض اکسیژن و آب، تحت شرایط pH و Eh خاصی تشکیل می‌شود. کانی‌های تشکیل‌شده از اکسایش پیریت شامل کوپاپیت $(Fe^{2+}Fe^{3+}_4(SO_4)_6)$

می‌شود. کانی فری‌هیدریت در pH نزدیک به خنثی، محیط با سیلیس محلول و مواد آلی بالا تشکیل می‌شود. هماتیت نیز یکی از اکسیدهای آهن است که در pH خنثی تشکیل می‌شود (شکل ۱). کانی لپیدوکروزیت از پلی‌مورف‌های گوتیت است و به‌صورت کانی ورقه‌ای غالباً همراه با آن دیده می‌شود (محمدی، ۱۳۸۱).

خصوصاً تجمع کانی‌های ثانویه آهن در باطله‌های معادن سولفیدی غنی از آهن، کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت در شرایط سولفات بالا و pH خیلی پایین تشکیل می‌شود. البته، تشکیل ژاروسیت مشروط به حضور پتاسیم یا سدیم در محیط است. با کاهش میزان سولفات و افزایش pH محیط به‌ترتیب کانی‌های شورتمانیت و گوتیت تشکیل



شکل ۱. مدل تجمع کانی‌های ثانویه آهن در باطله‌های معادن سولفیدی غنی از آهن (Montero et al., 2005 با تغییرات).

اسیدی تشکیل می‌شود (Swayze et al., 2000; Kopačková, 2014). Zabcic و همکاران (۲۰۰۵، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴) از داده‌های ابرطیفی هوابرد Hymap برای شناسایی pH سطحی و زهاب اسیدی در معدن سوتیل-میگولاس^۵ استفاده و کانی‌های ثانویه مانند هماتیت و ژاروسیت را بارزسازی کردند. در این مطالعات مواد با pH پایین (اسیدی) مانند ژاروسیت در سد باطله‌ها و اطراف رودخانه‌های مرتبط با معدن شناسایی شد.

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه تعیین زهاب اسیدی و کانی‌های آن با استفاده از روش‌های ژئوشیمی و ژئوفیزیک در

تحقیقات مختلفی با استفاده از سنجنده‌های AVIRIS، اطلاعات کاسی^۱ و داده‌های ژئوفیزیکی هوابرد برای شناسایی کانی‌های زهاب اسیدی و نقشه‌برداری باطله‌های معدنکاری در معادن مختلف دنیا از جمله معدن ری^۲، ونیر^۳ و اینکو^۴ انجام گرفته و کانی‌های ژاروسیت و گوتیت شاخص زهاب اسیدی شناسایی و نقشه‌برداری شده است (Swayze et al., 2000; Mc Cubbin & Lang, 2000; Shang, 2005). طبق بررسی‌های انجام شده وجود گوتیت فراوان در باطله‌های معدن، همچنین نشانه اکسایش پیریت در مرحله پیشرفته است و ژاروسیت نیز در شرایط خیلی

زهاب اسیدی و حضور باکتری‌های اکسیدکننده و عامل تشدیدکننده آن در معدن مس دره‌زار است. همان‌طور که بیان شد، در مطالعات خارج از ایران علاوه بر روش‌های ژئوشیمیایی، از مطالعات سنجش از دور نیز برای شناسایی زهاب اسیدی استفاده شده است. ولی در داخل ایران مطالعات سنجش از دور کمتر انجام شده است. در معدن دره‌زار نیز که یکی از معادن مهم مس پورفیری ایران محسوب می‌شود، زهاب اسیدی با روش‌های سنتی بررسی شده و عمده مطالعات سنجش از دور در این منطقه برای مطالعات اکتشافی و بارزسازی کانی‌های دگرسانی با کمک تصاویر ماهواره‌ای مختلف چندطیفی (استر، اسپات و سری لندست) و ابرطیفی (هایپریون) صورت گرفته است (درگاهی، ۱۳۹۰؛ Ranjbar et al., 2000, 2004; Shahriari et al., 2013; Abedi et al., 2013; Hosseinjani Zadeh et al., 2014a, 2014c). در هیچ‌کدام از این مطالعات به بررسی زهاب اسیدی و مطالعات محیط‌زیستی در محدوده معدن دره‌زار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌ویژه لندست ۸ پرداخته نشده است. لندست ۸ هشتمین ماهواره از سری ماهواره‌های لندست و هفتمین ماهواره از این پروژه است که در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب و با موفقیت در مدار قرار گرفت. این ماهواره دارای دو ابزار تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) و سنجنده فرورسرخ حرارتی (TIR) است که سنجنده OLI دارای باندهایی از محدوده مرئی تا فرورسرخ کوتاه‌موج (۲۳۰۰-۴۳۳ نانومتر) است. محدوده طیفی و تفکیک مکانی هر یک از باندهای سنجنده لندست ۸ در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات باندهای سنجنده لندست ۸

شماره باند	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹	باند ۱۰	باند ۱۱
محدوده طیفی (میکرومتر)	۰/۴۳۳-۰/۴۵۳	۰/۴۵۰-۰/۴۵۵	۰/۵۲۵-۰/۶۳۰	۰/۶۳۰-۰/۶۸۰	۰/۸۴۵-۰/۸۸۵	۱/۵۶۰-۱/۶۶۰	۲/۱۰۰-۲/۳۰۰	۰/۵۰۰-۰/۶۸۰	۱/۳۶۰-۱/۳۹۰	۱۰/۶-۱۱/۲	۱۱/۵-۱۲/۵
تفکیک مکانی (متر)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۱۵	۳۰	۱۰۰	۱۰۰

معدن مس پورفیری سرچشمه، سونگون و معدن زغال‌سنگ شمال کشور مانند معدن گلندرود، همچنین کارخانه‌های زغال‌شویی البرز شرقی و وطنی انجام شده است (آقائی کریق و همکاران، ۱۳۹۰؛ مرادزاده، ۱۳۹۱؛ معصومی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Karimi Nasab et al., 2001; Shahabpour & Doorandish, 2008; Khorasanipour, 2015). همچنین، در زمینه بررسی آثار زهاب اسیدی و راهکارهای مدیریتی برای کاهش آن نیز مطالعاتی صورت گرفته است، به‌طوری که راهکارهای مدیریت آب باعث کاهش زهاب اسیدی در معدن سرچشمه شده است (معصومی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Alipour & Derakhshani, 2010). در زمینه بارزسازی زهاب اسیدی با استفاده از سنجش از دور مطالعات کمتری صورت گرفته است؛ از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده در معدن کارمزد و منطقه تکاب اشاره کرد. در این مطالعات با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر مانند آنالیز مؤلفه اصلی، نقشه‌برداری زاویه طیفی و ترکیب رنگی روی تصاویر استر، آلودگی زهاب اسیدی و فلزات سنگین بررسی شده است (روح‌بخش و معدنچی، ۱۳۹۲؛ Moore & Rastmanesh, 2006).

در معدن دره‌زار با استفاده از مطالعات ژئوشیمیایی روی نمونه‌های آب و خاک به شناسایی آلودگی زهاب اسیدی پرداخته شده است (کشاورزی و همکاران، ۱۳۸۴؛ مر و همکاران، ۱۳۹۱). مؤذن‌زاده و همکاران (۱۳۸۵) نیز با بررسی علل تولید زهاب اسیدی نشان دادند که حضور کانی‌های سولفیدی (به‌ویژه پیریت) موجود در کانسنگ مس و تماس کانی‌های سولفیدی با اکسیژن هوا و آب (در اثر نفوذ آب‌های زیرزمینی و سطحی) از عوامل پایه تولید

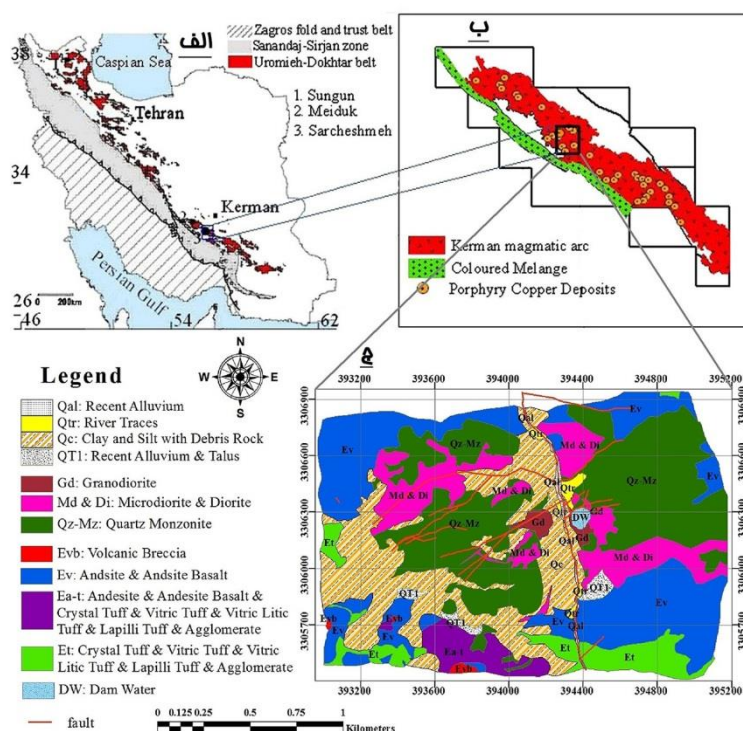
کرمان) و ۱۷۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان کرمان واقع شده است (شکل ۲ الف و ب). این کانسار در منطقه‌ای کوهستانی با روند شمال شرقی - جنوب غربی قرار گرفته است و قلی با ارتفاع بیش از ۳۲۰۰ متر در منطقه وجود دارد. رودخانه دره زار با امتداد شمالی - جنوبی از وسط کانسار می‌گذرد (شکل ۲ ج) (کشاورزی و همکاران، ۱۳۸۴; Hosseinjani Zadeh et al., 2014c; www.nicico.com).

کانسار دره زار از نوع توده‌ای آذرین و متشکل از سنگ‌های آذرین آندزیتی، تراکی آندزیتی و اگلومرا با سن ائوسن است که در الیگومیوسن سنگ‌هایی با ترکیب کوارتز دیوریت و گرانودیوریت در این مجموعه نفوذ کرده و متعاقباً باعث کانی‌سازی مس شده است. توده اصلی ماده معدنی نیز به شکل لاکولیت قارچی شکل حاوی انکلاوهای بزرگ سنگ آندزیتی است (شکل ۲ ج) (مؤذنزاده و همکاران، ۱۳۸۵).

باتوجه به اینکه لندست ۸ دارای خصوصیتی مانند رایگان‌بودن، تفکیک زمانی نسبتاً خوب (۱۶ روز) و تفکیک طیفی مناسب در محدوده مرئی و فرورسرخ (VNIR) است، می‌توان از آن در مطالعات محیط‌زیستی و شناسایی کانی‌های آهن‌دار موجود در زهاب اسیدی استفاده کرد. هدف از این تحقیق عبارت است از بررسی ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص زهاب اسیدی و بارسازی و شناسایی کانی‌های آهن‌دار مرتبط با زهاب اسیدی در محدوده معدن دره زار با کمک ویژگی‌های طیفی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ است.

۲. مواد و روش‌ها

معدن مس دره زار با طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی در قسمت جنوبی کمان ماگمایی ارومیه-دختر، قسمت مرکزی کمربند آتشفشانی-رسوبی دهج-ساردوئیه (کمربند مس



شکل ۲. الف) موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و کمربند ارومیه-دختر، ب) موقعیت منطقه مطالعاتی در ناحیه کرمان و کمربند دهج-ساردوئیه، ج) نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی (Alizadeh Sevari & Hezarkhani, 2014; Hosseinjani Zadeh et al, 2014b)

شبهات کانی‌های ژاروسیت و کوپاپیت (مربوط به شرایط خیلی اسیدی)، کانی‌های شورتمانیت و گوتیت (مربوط به شرایط اسیدی) و کانی‌های فری‌هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت (مربوط به شرایط خنثی و نزدیک به خنثی) بررسی شد. سپس، بر اساس باندهای جذبی و بازتابی اصلی کانی‌ها و پردازش مناسب روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، مناطق دارای پتانسیل زهاب اسیدی بارزسازی شد که برای اجرای پردازش‌ها از نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده گردید. برای آماده‌سازی تصویر، نخست تصحیح اتمسفری خط دید سریع مکعب‌های ابرطیفی (FLAASH) روی تصویر اعمال شد تا تأثیرات جوی موجود بر پیکسل‌های تصویر کاهش یابد و خطاهای جوی از بین برود (ITT Visual Information Solutions, 2008). برای پردازش تصویر نیز از تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی (PCAs) استفاده شد تا حجم داده‌ها کم و مؤلفه‌های اصلی و دربرگیرنده اطلاعات طیفی کانی‌های آهن‌دار شاخص زهاب اسیدی شناسایی شود. برای این منظور تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی، معروف به تکنیک کروس‌تا، بر اساس موقعیت ویژگی‌های طیفی کانی‌های ثانویه آهن مرتبط با کانی‌های زهاب اسیدی اجرا شد (Crosta et al., 2003; Ranjbar et al., 2004). قبل از انجام تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی به منظور جلوگیری از تداخل پوشش گیاهی و اکسید آهن، پوشش گیاهی با اعمال شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۹ شناسایی و سپس ماسک شد.

بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های طیفی و پردازش تصویر لندست ۸، مناطق خیلی اسیدی از اسیدی تا نزدیک به خنثی شناسایی شد. سپس، به منظور ارزیابی نتایج، از منطقه مورد مطالعه بازدید به عمل آمد و از محدوده‌های بارز شده با پردازش تصویر نمونه‌برداری سنگ و آب انجام شد. اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌های آب و طیف‌سنجی نمونه‌های سنگ در آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته صورت گرفت.

دگرسانی‌های عمده در این کانسار فیلک و پروپلیتیک است و دگرسانی آرژیلیک نیز مشاهده می‌شود. هوازدگی سطحی باعث به وجود آمدن لیمونیت و اکسیدهای آهن در سطح سنگ‌ها و از بین رفتن سولفیدها و غنی‌شدگی مس در زون غنی‌شده ثانویه شده است. کانی‌های سولفیدی موجود در زون دگرسانی فیلک نقش عمده‌ای در تولید زهاب اسیدی ایفا می‌کند (کشاورزی و همکاران، ۱۳۸۴؛ روانخواه و همکاران، ۱۳۸۸). چهار زون فروشست، اکسیدی، برونزاد و درونزاد در کانسار تیپ پورفیری دره‌زار مشاهده می‌شود. زون فروشست در سطح فاقد آثار کانی‌سازی است و در برخی موارد هماتیت، لیمونیت و ژاروسیت حاصل از انحلال پیریت و کانه‌های مس‌دار در داخل حفرات مشاهده می‌شود. بخش عمده زون اکسیدی در اثر فرسایش از بین رفته است. کانه‌های مشاهده‌شده در این زون مالاکیت، آزوریت، توریت، کریزوکولا، گوتیت و کالکانتیت است. گسترش زون برونزاد همراه با دگرسانی فیلک است. کالکوسیت کانی اصلی این زون است که در اغلب موارد از حاشیه به کولیت تجزیه شده است. زون درونزاد در این کانسار اغلب بر زون‌های دگرسانی پتاسیک، پتاسیک-فیلک و پتاسیک منطبق است و پاراژنز کانی‌شناسی در این زون پیریت، کالکوپیریت و به میزان جزئی کالکوسیت، کولیت، مگنتیت، بورنیت و مولیبدنیت است (روانخواه و همکاران، ۱۳۸۸؛ درگاهی، ۱۳۹۰).

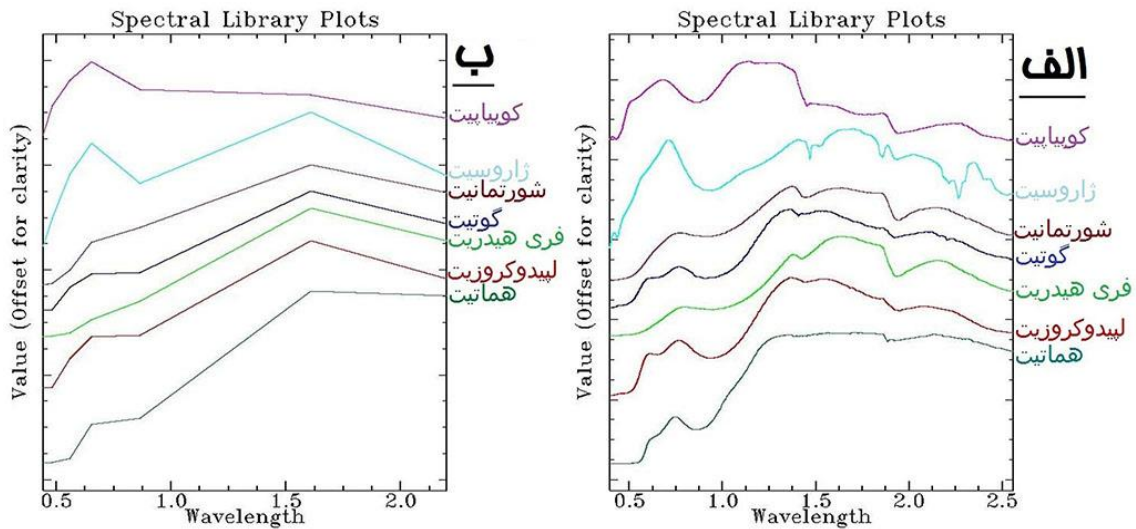
برای شناسایی ویژگی‌های طیفی کانی‌های آهن‌دار شاخص زهاب اسیدی اعم از کوپاپیت، ژاروسیت، شورتمانیت، گوتیت، فری‌هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت، از مطالعات Zabcic (۲۰۰۸) و طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی USGS^۷ موجود در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. همچنین، طیف کانی‌های مذکور بر اساس مرکز باندهای سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ بازنویسی و سپس بازتاب و جذب آن در طیف بازنویسی شده نیز بررسی شد.

بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های طیفی، میزان

۱.۲. ویژگی‌های طیفی

بر اساس بررسی طیف کانی‌های کتابخانه طیفی USGS و مطالعات Zabcic (۲۰۰۸) مشخص شد که در ساختمان کانی‌های ثانویه آهن شاخص زهاب اسیدی مانند کانی‌های کوپاپیت، ژاروسیت، شورتمانیت، گوتیت، فری هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت به دلیل وجود آهن فریک (Fe^{3+}) در محدوده‌های مرئی (۰/۴۸۰-۰/۴۳۰ و ۰/۶۷۰-۰/۵۰۰ میکرومتر) و فروسرخ نزدیک (۰/۹۴۰-۰/۸۵۰ میکرومتر) و به دلیل وجود آب و ارتعاشات بنیان‌های OH در محدوده فروسرخ موج کوتاه (۱/۴ و ۱/۹ میکرومتر) ویژگی‌های جذبی نشان می‌دهد. به علاوه، کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت که در محیط‌های خیلی اسیدی تشکیل می‌شود، به دلیل وجود ارتعاشات بنیان‌های OH و SO_4 در محدوده فروسرخ موج کوتاه (۱/۸-۱/۷ و ۲-۲/۷ میکرومتر) نیز جذب دارد. کانی کوپاپیت به دلیل وجود آهن فرو (Fe^{2+}) در محدوده فروسرخ نزدیک (۰/۹۴۷ و ۱/۱۷۰ میکرومتر) نیز ویژگی جذبی کوچکی نشان می‌دهد. موقعیت دقیق جذب‌های عمیق کانی ژاروسیت در ۰/۴۳۶ و ۰/۹۲۲-۰/۹۱۰ (به دلیل وجود آهن فریک)، ۱/۴۶۸ و ۱/۹۳۶ (به دلیل ارتعاشات OH)، ۱/۸۵۵، ۲/۲۱۵ و ۲/۲۶۵ (به دلیل وجود ارتعاش‌های بنیان‌های OH و SO_4) از طیف الکترومغناطیس قرارداد. در کانی کوپاپیت جذب‌های عمیق در ۰/۴۳۰ و ۰/۸۶۶-۰/۸۵۰ (به دلیل وجود آهن فریک)، ۱/۴۵۳ و ۱/۹۴۵ (به دلیل ارتعاش‌های OH) مشاهده می‌شود. کانی شورتمانیت در ۰/۴۸۹ و ۰/۹۱۸-۰/۹۱۰ (به دلیل وجود آهن فریک)، ۱/۴۵۰ و ۱/۹۴۵ (به دلیل ارتعاش‌های OH) جذب عمیق نشان می‌دهد. کانی‌های گوتیت و لپیدوکروزیت دارای جذب‌های عمیق در ۰/۴۸۰ و ۰/۴۳۹ (به دلیل وجود آهن فریک) و ۱/۹۲۵ (به دلیل ارتعاش‌های OH) است. جذب‌های عمیق در کانی فری هیدریت در ۰/۴۸۹ و ۰/۹۴۹ (به دلیل وجود آهن فریک)، ۱/۴۲۰ و ۱/۹۴۰ (به دلیل ارتعاش‌های OH) مشاهده می‌شود. جذب‌های عمیق کانی هماتیت نیز در

۰/۴۸۰ و ۰/۸۷۲ (به دلیل وجود آهن فریک) و ۱/۸۸۵ (به دلیل ارتعاش‌های OH) وجود دارد (شکل ۳ الف). بر اساس طیف بازنویسی شده کتابخانه طیفی USGS به مرکز باندهای سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، کانی‌های شورتمانیت، گوتیت، فری هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت به دلیل جذب آهن فریک (Fe^{3+}) در محدوده‌های مرئی و فروسرخ نزدیک در باندهای آبی (باندهای ۱ با محدوده طیفی ۰/۴۵۳-۰/۴۳۳ میکرومتر و ۲ با محدوده طیفی ۰/۵۱۵-۰/۴۵۰ میکرومتر) جذب عمیق و در باندهای ۳ (محدوده طیفی ۰/۶۰۰-۰/۵۲۵ میکرومتر)، ۴ (محدوده طیفی ۰/۶۸۰-۰/۶۳۰ میکرومتر) و ۵ (محدوده طیفی ۰/۸۸۵-۰/۸۴۵ میکرومتر) نسبت به باندهای ۱ و ۲ بازتاب نشان می‌دهد. البته، با توجه به اینکه باند جذب اصلی این کانی‌ها در ۰/۴۸ میکرومتر است، جذب اصلی آن منطبق با باند ۲ (۰/۵۱۵-۰/۴۵۰ میکرومتر) است. حداکثر بازتاب این کانی‌ها در باند ۶ (محدوده طیفی ۱/۶۶۰-۱/۵۶۰ میکرومتر) لندست ۸ است (شکل ۳ ب). کانی‌های محیط خیلی اسیدی مانند کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت در باندهای ۱ و ۵ به دلیل وجود آهن فریک (Fe^{3+}) و ژاروسیت در باند ۷ به دلیل وجود ارتعاش‌های بنیان‌های OH و SO_4 ویژگی جذبی نشان می‌دهد. به دلیل موقعیت باندهای جذبی این دو کانی که ۰/۴۳۶ میکرومتر است، در باندهای ۲ و ۳ جذب کمتری نسبت به باند ۱ دیده می‌شود. کانی کوپاپیت فقط در باند ۴ بازتاب دارد، در حالی که کانی ژاروسیت علاوه بر باند ۴ در باند ۶ نیز بازتاب نشان می‌دهد. باید توجه داشت که طبق مشخصات طیفی کانی‌های شاخص زهاب اسیدی اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین باند ۶ (۱/۶۶-۱/۵۶ میکرومتر) و ۷ سنجنده (۲/۳-۲/۱ میکرومتر) بیشتر در کانی ژاروسیت قابل مشاهده است و کانی‌های دیگر به جز هماتیت اختلاف کمتری نشان می‌دهد (شکل ۳ ب). این امر به این دلیل است که تنها کانی ژاروسیت در محدوده ۲/۲۶ میکرومتر و منطبق با باند ۷ لندست و دارای سیمای جذبی شاخصی است (شکل ۳ الف).



شکل ۳. الف) طیف کتابخانه طیفی USGS، ب) طیف بازنویسی شده بر اساس باندهای لندست ۸

(۲/۳۰۰-۲/۱۰۰ میکرومتر) در کانی‌های ژاروسیت و کویپایت به دلیل ارتعاش‌های SO_4 و OH و بازتاب باند ۴ (۰/۶۸۰-۰/۶۳۰ میکرومتر) در کانی‌های ژاروسیت و کویپایت و باند ۶ (۱/۶۶۰-۱/۵۶۰ میکرومتر) لندست ۸ در کانی‌های ژاروسیت، شورتمانیت، گوتیت، فری هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت در نظر گرفته شد. از آنجا که تفسیر جدول آماری بر اساس بازتاب و جذب کانی‌ها و مقادیر موجود در هر باند (ستون‌های جدول آماری) انجام می‌گیرد، لذا از بازتاب و جذب‌های مشخص شده در قسمت ویژگی‌های طیفی برای تفسیر جدول آماری استفاده شد. با توجه به اینکه در PC_2 جدول آماری، باند ۱ با بالاترین بارگذاری منفی و باند ۶ با بالاترین بارگذاری مثبت وجود دارد و کانی‌های هماتیت، لپیدوکروزیت، فری هیدریت، گوتیت و شورتمانیت در باند ۱ جذب عمیق و فقط در باند ۶ حداکثر بازتاب دارد، می‌توان انتظار داشت در این PC ، کانی‌های مذکور با رنگ روشن مشخص می‌شود. با توجه به اینکه بازتاب باند ۶ و جذب باند ۷ طیف بازنویسی شده کانی ژاروسیت با بازتاب و جذب‌های طیف بازنویسی نشده تطابق بیشتری دارد و کانی‌های رسی نیز در این دو باند ویژگی جذب و بازتابی مشابه با ژاروسیت دارد، PC_3 که در آن باند ۶ دارای بیشترین

۲.۲. آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

آنالیز مؤلفه اصلی روش آماری قوی و دارای آثار تابشی مسلط بر همه باندهاست و در نتیجه ویژگی‌های انعکاس طیفی مواد زمینی را افزایش می‌دهد. به علاوه، این تکنیک حجم داده‌ها را کم می‌کند و برای مجموعه داده‌های چند متغیره، مانند تصاویر سنجش از دور چند طیفی، با هدف استخراج پاسخ‌های طیفی ویژه به کار می‌رود. تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی معروف به تکنیک کروستا بر اساس بازتاب و جذب کانی‌ها اجرا و جدول آماری و تصاویر مؤلفه اصلی بررسی و تفسیر می‌شود. تکنیک کروستا بر اساس ارتباط میان پاسخ‌های طیفی مواد مشخص و ارزش‌های متعدد استخراج شده از ماتریس بردار ویژه، تصاویر مؤلفه اصلی را محاسبه می‌کند. با استفاده از این ارتباط، این تکنیک موادی را در مؤلفه‌های اصلی انتخابی نشان می‌دهد که با پیکسل‌های روشن و تیره در مؤلفه‌های اصلی، بر اساس بزرگی و علامت بارگذاری ویژه برداری مشخص می‌شود (Crosta et al., 2003; Ranjbar et al., 2004).

برای انجام این تکنیک جذب آهن فریک (Fe^{3+}) در باند ۱ (۰/۴۵۳-۰/۴۳۳ میکرومتر) برای کانی‌های کویپایت، ژاروسیت، شورتمانیت، گوتیت، فری هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت، جذب موجود در باند ۷

بارز شده است، زیرا در این PC باند ۱ دارای بیشترین بارگذاری منفی و باند ۴ دارای بیشترین بارگذاری مثبت است. در نتیجه، در PC4 این کانی با رنگ روشن بارز می‌شود، گرچه کانی ژاروسیت نیز به دلیل بازتاب در باند ۴ و جذب در باند ۱ در این PC ممکن است حضور داشته باشد (جدول ۲).

بارگذاری منفی و در باند ۷ دارای بیشترین بارگذاری مثبت است برای بارزسازی این کانی‌ها مناسب و در این PC کانی‌های ژاروسیت-رسی به رنگ تیره خواهد بود. برای بارز کردن کانی‌های ژاروسیت-رسی در PC3 با رنگ روشن، این PC در ۱- ضرب شده است. کانی کوپاپیت که در باند ۱ جذب و فقط در باند ۴ بازتاب دارد در PC4

جدول ۲. مشخصات آماری حاصل از تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی

Eigenvector	Band 1	Band 4	Band 6	Band 7
PC 1	-0.2198	-0.49896	-0.69173	-0.47353
PC 2	-0.65757	-0.55888	0.423789	0.27505
PC 3	0.023786	-0.0363	-0.5516	0.832982
PC 4	-0.72022	0.66134	-0.19404	-0.0791

و طیف‌های حاصل با طیف‌های کتابخانه طیفی USGS مقایسه شد.

۳. نتایج

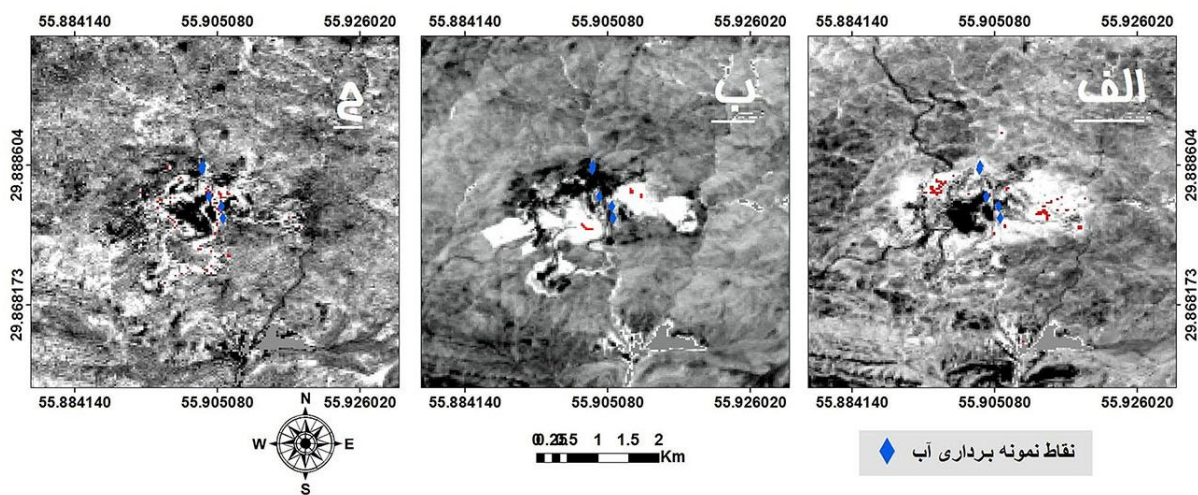
طبق بررسی‌های طیفی مشخص شد که هر چند شباهت‌هایی بین کانی‌های مختلف از جمله لپیدوکروزیت، گوتیت، شورتمانیت و فری هیدریت در طیف بازنویسی نشده کانی‌های کتابخانه طیفی USGS وجود دارد، به دلیل پوشش دادن محدوده طیفی زیاد و پهنای باند خیلی کم طیف‌سنج‌ها امکان شناسایی و تفکیک کانی‌های شاخص زهاب اسیدی با استفاده از مطالعات و بررسی‌های طیفی وجود دارد. در طیف بازنویسی شده بر اساس باندهای لندست ۸ کانی‌های لپیدوکروزیت، فری هیدریت، گوتیت و شورتمانیت که در محدوده اسیدی تا نزدیک به خنثی تشکیل می‌شود دارای سیمای طیفی مشابه است و امکان تفکیک آن از یکدیگر وجود ندارد. البته، این مجموعه طیف‌های بازنویسی شده با طیف بازنویسی ژاروسیت و کوپاپیت و متعلق به شرایط خیلی اسیدی متفاوت است. بنابراین، امکان تفکیک و شناسایی شرایط خیلی اسیدی از اسیدی تا نزدیک به خنثی با داده لندست ۸ وجود دارد.

در نهایت، بر اساس نتایج پردازش تصویر و به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج، طی عملیات میدانی از منطقه مورد مطالعه بازدید به‌عمل آمد و از محدوده‌های مشخص شده با پردازش تصویر، نمونه برداری سنگ و آب انجام گرفت. پنج نمونه آب از قسمت‌های مختلف شامل محل ورود آب به معدن (Da31)، چاه مشاهده‌ای داخل معدن (Da32)، گودال آب قسمت شرقی معدن (Da23)، آب تجمع یافته در قسمت غربی معدن (Da20) و محل خروج آب از معدن (Da24) برداشت شد (جدول ۳). نمونه‌های آب با بطری‌های مخصوص (پلی اتیلن) برداشت و در محل دمای آن ثبت و برای اندازه‌گیری pH و EC به آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته منتقل شد. پارامترهای pH و EC با دستگاه‌های pH سنج Metrohm 827 pH lab و EC سنج Metrohm 712 Conductometer اندازه‌گیری شد. نمونه‌های سنگ نیز بر اساس نتایج پردازش تصویر از دامپ‌های باطله جنوبی، غربی، شرقی و داخل پیت معدن برداشت و برای انجام طیف‌سنجی به آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان منتقل و طیف نمونه‌های سنگ با دستگاه طیف‌سنج زمینی ASD FieldSpec®3 تهیه

از دامپ شرقی عمدتاً طیف کانی گوتیت و ژاروسیت را مشخص کرد. همان‌طور که در شکل ۶ الف و ب مشاهده می‌شود، طیف زمینی نمونه‌های دامپ غربی و شرقی به ترتیب دارای ویژگی طیفی مشابهی با طیف هماتیت و گوتیت کتابخانه طیفی USGS است. البته، در طیف‌های نمونه‌های زمینی علاوه بر ویژگی‌های جذبی کانی‌های هماتیت و گوتیت، جذب کانی‌های رسی در محدوده فرسرخ موج کوتاه نیز قابل مشاهده است.

پیکسل‌های روشن در PC3- مربوط به بارزسازی ژاروسیت-رس است که تمام فضای داخل معدن و دامپ‌های باطله را فرا گرفته است. مناطق بارز شده در PC3 ژاروسیت-رس با مناطق زون‌های فیلیک و آرتزلیک معدن دره‌زار منطبق است. لازم به ذکر است که پیکسل‌های دارای مقادیر بالا در قسمت میانی و شرقی معدن (رنگ قرمز) دیده می‌شود (شکل ۴ ب). با توجه به مقادیر باندهای ۱ و ۴ جدول آماری و بازتاب و جذب مشابه کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت در محدوده مرئی، در PC4 کانی‌های مذکور در راستای آبراهه اصلی وسط معدن قرار گرفته است (شکل ۴ ج).

با توجه به جدول آماری حاصل از تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی (جدول ۲) و بازتاب و جذب مشابه کانی‌های هماتیت، لپیدوکروزیت، فری‌هیدریت، گوتیت و شورتمانیت در طیف بازنویسی شده که از شرایط خشتی (هماتیت) تا اسیدی (گوتیت و شورتمانیت) تشکیل می‌شود، در PC2 کانی‌های مذکور به رنگ روشن مشخص شده است. محدوده بارز شده در PC2 بیشتر قسمت‌های اطراف معدن را پوشش می‌دهد و پیکسل‌های دارای مقادیر بالاتر (به رنگ قرمز) در دامپ شرقی، قسمت‌هایی شرق و شمال غرب معدن هنوز فعالیت معدنی گسترده‌ای ندارد (شکل ۴ الف). بر اساس اقلیم منطقه (خشک و پوشش گیاهی کم) و شرایط تشکیل کانی فری‌هیدریت (محیط دارای مواد آلی فراوان) انتظار می‌رود کانی فری‌هیدریت در منطقه مورد مطالعه به مقادیر خیلی ناچیزی وجود دارد (درگاهی، ۱۳۹۰؛ Montero et al., 2005). طی مطالعات صحرائی، کانی‌های ثانویه آهن مانند هماتیت و گوتیت در دامپ‌های شرقی و غربی مشاهده شد (شکل ۵). نتایج طیف‌سنجی نمونه‌های سنگی برداشت شده از دامپ غربی طیف کانی‌های گوتیت و هماتیت و نمونه‌های برداشت شده



شکل ۴. نتایج حاصل از PCA انتخابی باندهای ۱، ۴، ۶ الف) بارزشدگی مجموعه کانی‌های شورتمانیت، گوتیت، فری‌هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت در PC2 لندست ۸، ب) بارزشدگی کانی‌های رسی و ژاروسیت در PC3-، ج) بارزشدگی کانی‌های ژاروسیت و کوپاپیت در PC4

(Da23) و آب‌های تجمع‌یافته در قسمت غربی معدن (Da20) هدایت الکتریکی (EC) بالا و pH پایین نشان می‌دهد (جدول ۳)، در صورتی که نمونه‌های آب ورودی (Da31) و خروجی معدن (Da24) دارای pH خنثی و EC پایین است. قسمت مشخص‌شده به‌عنوان کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت در PC4 با مکان‌های نمونه‌برداری آب تطبیق دارد و نمونه‌های آب با EC بالا و pH پایین نیز در این قسمت قرارداد.

نتایج آنالیز مؤلفه اصلی کانی‌های دارای طیف‌های مشابه را در PC بارز کرد. برای مثال، کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت که مربوط به شرایط خیلی اسیدی است در PC4 و کانی‌های هماتیت، لپیدوکروزیت، فری‌هیدریت، گوتیت و شورتمانیت که مربوط به شرایط اسیدی تا خنثی است در PC2 شناسایی شد. همچنین، در PC3- کانی‌های رسی و ژاروسیت شناسایی شد.

براساس نتایج اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌های آب، نمونه‌های آب محل گودال واقع در قسمت شرقی معدن

جدول ۳. pH و EC نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه

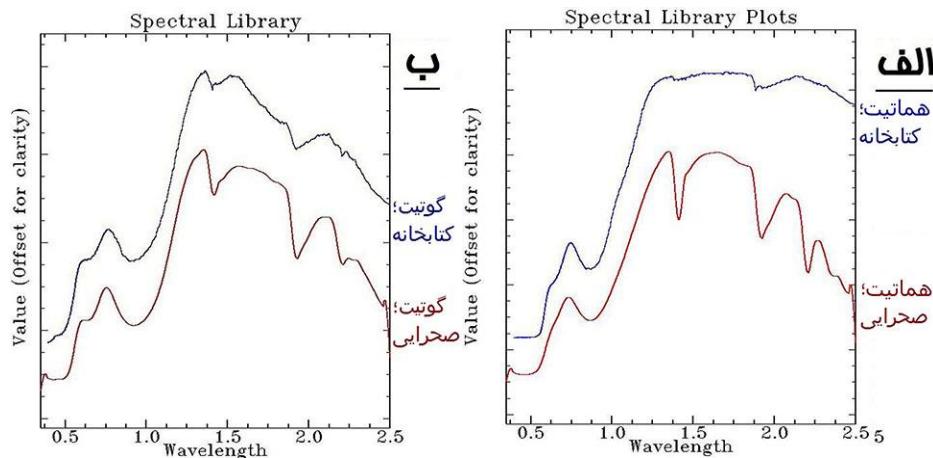
نام	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	هدایت الکتریکی (EC)	pH
Da20	۵۵/۹۰۳۸۹۵۹۶	۲۹/۸۸۴۰۷۱۹۶	۱/۵۷۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر	۳/۴۸
Da23	۵۵/۹۰۵۷۰۲۰۱	۲۹/۸۸۲۶۷۸۹۸	۱/۵۸۳ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر	۴/۲۸
Da24	۵۵/۹۰۵۸۹۶۹۷	۲۹/۸۸۰۹۶۰۰۲	۵۸۲/۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر	۷/۸۸
Da31	۵۵/۹۰۲۹۸۹۰۴	۲۹/۸۸۸۵۵۹۹۷	۴۵۳/۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر	۷/۹۰
Da32	۵۵/۹۰۲۸۱۰۰۰	۲۹/۸۸۸۰۳۶۰۲	۱/۹۹۱ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر	۷/۲۳

آب‌های اسیدی ذخیره می‌شد. در زمان بارندگی شدید و در صورت عدم ظرفیت کافی در حوضچه‌ها، ممکن است آب‌های اسیدی باعث آلودگی آب‌های خروجی از معدن شود که این امر در مدیریت برنامه‌ریزی معدن باید در نظر گرفته شود.

براساس نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که علی‌رغم وجود آب‌های دارای pH پایین و EC بالا در داخل معدن، آب خروجی معدن دارای pH خنثی و EC پایین است. این امر عدم تأثیرپذیری آب خروجی از آب‌های اسیدی داخل معدن را در زمان نمونه‌برداری نشان می‌دهد، زیرا در زمان نمونه‌برداری زهاب معدن داخل حوضچه‌های نگهداری



شکل ۵. الف) اکسید آهن در دامپ غربی معدن (دید عکس به سمت جنوب شرق)،
ب) اکسید آهن در دامپ باطله شرق معدن (دید عکس به سمت شمال غرب)



شکل ۶. الف) طیف زمینی نمونه سنگ برداشت‌شده از دامپ غربی و طیف کتابخانه USGS کانی هماتیت، ب) طیف زمینی نمونه سنگ برداشت‌شده از دامپ شرقی و طیف کتابخانه USGS کانی گوتیت

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی ویژگی‌های طیفی کانی‌های ثانویه آهن شاخص زهاب اسیدی نشان داد که اولین جذب عمیق در کانی‌های مرتبط با محیط‌های خیلی اسیدی مانند کوپاپیت (۰/۴۳۰ میکرومتر) و ژاروسیت (۰/۴۳۶ میکرومتر) در طول موج‌های پایین‌تری نسبت به اولین جذب عمیق در کانی‌های مرتبط با محیط اسیدی تا خنثی مانند شورتمانیت (۰/۴۸۹ میکرومتر)، گوتیت (۰/۴۸۰ میکرومتر)، فری‌هیدریت (۰/۴۸۹ میکرومتر)، لپیدوکروزیت (۰/۴۸۰ میکرومتر) و هماتیت (۰/۴۸۰ میکرومتر) قرار می‌گیرد. همچنین، کانی ژاروسیت (محیط خیلی اسیدی) در محدوده فرسرخ موج کوتاه ۲/۲۶ میکرومتر) به دلیل وجود بنیان‌های SO_4 و OH ویژگی‌های جذبی نشان می‌دهد، در حالی که در کانی‌های شورتمانیت، گوتیت، فری‌هیدریت، لپیدوکروزیت و هماتیت در محدوده مذکور هیچ ویژگی جذبی وجود ندارد. طبق بررسی‌های طیفی مشخص شد که با وجود شباهت‌های بین کانی‌های مختلف از جمله لپیدوکروزیت، گوتیت، شورتمانیت و فری‌هیدریت، به دلیل محدوده طیفی گسترده و پهنای باند خیلی کم طیف‌سنج‌ها امکان شناسایی و تفکیک کانی‌های شاخص زهاب اسیدی با استفاده از مطالعات و بررسی‌های طیفی وجود دارد.

همچنین، نتایج پردازش تصویر نشان داد که تصاویر لندست ۸ مجموعه کانی‌های هماتیت، گوتیت، لپیدوکروزیت، فری‌هیدریت و شورتمانیت دارای طیف‌های نسبتاً مشابه با لندست ۸ را از یکدیگر تفکیک نمی‌کند، ولی به دلیل تفاوت با کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت امکان تفکیک و شناسایی شرایط خیلی اسیدی از اسیدی تا نزدیک به خنثی با داده لندست ۸ وجود دارد. بر اساس نتایج آنالیز مؤلفه اصلی، کانی‌هایی هماتیت، لپیدوکروزیت، فری‌هیدریت و گوتیت که در pH اسیدی نزدیک به خنثی تشکیل می‌شود در محدوده‌های اطراف معدن بارز و کانی‌های کوپاپیت و ژاروسیت که در شرایط اسیدی‌تر (pH پایین) تشکیل می‌شود در داخل پیت معدن بارز شده است. نتایج میدانی و آزمایشگاهی نیز با نتایج پردازش تصویر هماهنگ است، به طوری که در نتایج طیف‌سنجی نمونه‌های برداشت شده از دامپ‌های باطله شرقی و غربی معدن کانی‌های گوتیت و هماتیت مشخص شد که با کانی‌های هماتیت، لپیدوکروزیت، فری‌هیدریت، گوتیت و شورتمانیت بارز شده در PC2 تطبیق داشت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری شرکت ملی صنایع مس ایران و مساعدت‌های مدیریت و پرسنل محترم امور تحقیق

یادداشت‌ها

1. Compact Airborne Spectrographic Imager (casi)
2. Ray Mine
3. Venir mine
4. Inco
5. Sotiel Migollas
6. www.landsat.usgs.gov; www.fa.wikipedia.org
7. www.landsat.usgs.gov
8. United States Geological Survey
9. Normalize Difference Vegetation Index

و توسعه مجتمعات مس سرچشمه و دره‌زار به‌ویژه آقایان مهندس خسرو جردی، دکتر صحرایی و مهندس سلاجقه طی نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف معدن صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- آقائی کریم، م.، رقیمی، م.، شمعیان، غ.ج. و قلی‌پور، م. ۱۳۹۰. نقش زهاب اسیدی در تشکیل کانی‌های زیست‌محیطی (کانی‌های ثانویه) در معدن زغال‌سنگ گلندرود و باطله‌های کارخانه زغال‌شویی وطنی، استان مازندران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲: ۳۲۵-۳۲۸.
- درگاهی، س. ۱۳۹۰. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی در کانسار مس دره‌زار: همراه با بهره‌گیری از نرم‌افزار GIS و سنجش از دور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- روانخواه، ع.، مؤید، م.، امینی، ص. و حسین‌زاده، ق. ۱۳۸۸. مطالعات زمین‌شناسی، پترولوژی، زمین‌شناسی اقتصادی و زون‌های دگرسانی در کانسار مس پورفیری دره‌زار (جنوب غرب کرمان). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۲: ۶۳-۷۵.
- روح‌بخش، پ. و معدنچی، ا. ۱۳۹۲. بررسی گسترش آلودگی زهاب اسیدی با کمک دورسنجی در معدن کارمزد، استان مازندران. هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد: ۵-۱.
- شرکت ملی صنایع مس ایران (www.nicico.com).
- کشاورزی، ب.، شهاب‌پور، ج.، ناصح، ر. و زاهدی‌نژاد، م. ۱۳۸۴. بررسی ژئوشیمیایی زهاب اسیدی در معدن مس دره‌زار. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، ۱۱ ص. <http://www.civilica.com/>
- محمدی، م. ۱۳۸۱. کانی‌شناسی غیرسیلیکاته (رشته زمین‌شناسی)، نوشته دوايت دینا، ج. ۱، ۱۸۵۵، دانشگاه پیام نور.
- مُر، ف.، سلطانی، ن.، کشاورزی، ب.، اسماعیل‌زاده، ع. و کریمی، م. ۱۳۹۱. زمین‌شیمی زیست‌محیطی آب، خاک و رسوبات کانسار مس دره‌زار (کرمان). مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۳(۱): ۲۹-۳۷.
- مرادزاده، ع.، زارع، م. و دولتی‌ارده‌جانی، ف. ۱۳۹۱. تشخیص منطقه آلودگی حاصل از زهاب اسیدی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئوالکتریک در محدوده کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی. مجله ژئوفیزیک ایران، ۲(۶): ۹۵-۱۱۱.
- معصومی، ع.، دولتی‌ارده‌جانی، ف.، اصلانی، س.، مظاهری، ن. و اسمعیل‌زاده، ع. ۱۳۹۲. بررسی تأثیرات زهاب اسیدی معدن سونگون بر آب رودخانه‌های اطراف معدن. سی‌ودومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.
- مؤذن‌زاده، م.، طباطبایی، س.ع. و حسینی مهمویی، ح. ۱۳۸۵. بررسی علل تولید زهاب‌های اسیدی در معدن مس دره‌زار و راه‌های کنترل آن. ششمین همایش ایمنی بهداشت و محیط‌زیست در معادن و صنایع معدنی، سرفصل محیط‌زیست: ۴۳۵-۴۴۶.
- ویکی‌پدیا، دانشنامه آزاد (www.fa.wikipedia.org).

- Alipour, M. and Derakhshani, R. 2010. Water management and AMD minimizing in Sarcheshmeh mine, Iran. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 7(2): 188-194.
- Alizadeh Sevari, B. and Hezarkhani, A. 2014. Hydrothermal evolution of Darrehzar porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. *Arab J Geosci*, 7: 1463-1477.
- Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F. and Brodie, C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote sensing*, 21: 4233-4240.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V. and Yusta, I. 2014a. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *Advances in Space Research*, 53: 440-451.
- Hosseinjani, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F. and Yusta. 2014b. Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, 62: 191-198.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F. and Yusta, I. 2014c. Mineral exploration and alteration zone mapping using mixture tuned matched filtering approach on ASTER data at the central part of Dehaj-Sarduiyeh Copper Belt, SE Iran. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 284-289.
- ITT Visual Information Solutions. 2008. FLAASH Module User's Guide. FLAASH Module Version 4.5.
- Karimi Nasab, S., Sahraiee Parizi, H. and Saadloo, M. 2001. Acid mine drainage at Sarcheshmeh copper open pit mine. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET.
- Khorasanipour, M. 2015. Environmental mineralogy of Cu-porphyry mine tailings, a case study of semi-arid climate conditions, Sarcheshmeh mine, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 153: 40-52.
- Kopačková, V. 2014. Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 28-42. Landsat (<http://landsat.usgs.gov>).
- Mc Cubbin, I. and Lang, H. 2000. Mapping environmental contaminants at Ray Mine, AZ. Technical Report, NASA.
- Montero, S.I.C., Brimhall, G.H., Alpers, C.N. and Swayze, G.A. 2005. Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping. *Chemical Geology*, 215: 453-472.
- Moore, F. and Rastmanesh, F. 2006. Application of ASTER data in characterization of environmental pollution in Takab area, NW Iran. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25: 226-226.
- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z. 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM⁺ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 237-243.
- Ranjbar, H., Roonwal, G.S., Ravindran, K.V. and Babar, S. 2000. Synergetic use of remote sensing and geophysical data for exploration of porphyry copper deposits, using GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 28(2&3): 205-212.
- Shahabpour, J. and Doorandish, M. 2008. Mine drainage water from the Sar Cheshmeh porphyry copper mine, Kerman, IR Iran. *Environ Monit Assess*, 141: 105-120.
- Shahriari, H., Ranjbar, H. and Honarmand, M. 2013. Image segmentation for hydrothermal alteration mapping using PCA and concentration-area fractal model. *Natural Resources Research*, 22(3): 191-206.
- Shang, J. 2005. Mapping mine tailings using Airborne Geophysical and Hyperspectral Remote Sensing Data. Ph.D dissertation, The University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Sam Vance, J., Hageman, P.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J. and Roth, S. 2000. Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste, environmental. *Science and Technology*, 34: 47-54.
- Zabcic, N., Rivard, B., Ong, C. and Mueller, A. 2014. Using airborne hyperspectral data to characterize the surface pH and mineralogy of pyrite mine tailings. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32: 152-162.
- Zabcic, N. 2008. Derivation of surface pH-values based on mineral abundances over pyrite mining areas with airborne hyperspectral data (Hymap) of Sotiel-Migollas mine complex, Spain. M.S dissertation, Edmonton, university of Alberta.
- Zabcic, N., Ong, C., Müller, A. and Rivard, B. 2005. Mapping surface pH using airborne Hyperspectral imagery at the Sotiel-Migollas Mine, Spain. *EARSeL and Warsaw University*, Warsaw: 409-414.