

کانی‌های تبخیری استان کرمان، با نگاهی ویژه به ویژگی‌های طیفی، کانی‌شناسی و دورسنجی

اعظم سلطانی نژاد*؛ دانشجوی دکتری، زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
حجت‌اله رنجیر؛ استاد، سنجش از دور زمین‌شناختی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
سارا درگاهی؛ استادیار، پتروژئولوژی، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
مهدی هنرمند؛ استادیار، زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶

چکیده

در این پژوهش، سیمای طیفی کانی‌های تبخیری موجود در مناطق تبخیری استان کرمان بررسی و قابلیت روش کمیته‌سازی انرژی مفید (CEM) در پارزسازی کانی‌های مذکور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استرژوپای شده است. محتوی طیفی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر برداشت و ترکیب کانی‌شناسی این نمونه‌ها با استفاده از روش تفریق اشعه ایکس (XRD) مشخص شده است. با استفاده از نتایج XRD، نمونه‌ها در قالب چهار گروه از نمونه‌های با کانی‌های غالب هالیت، زیمیس، کلسیت و نتاردیست در مناطق مطالعاتی استان کرمان مطالعه شد. شامل پلایای سیرجان، کفه خاتون‌آباد، تبخیری‌های منطقه راور، سه کراتر از کراترهای منطقه راین، کفه کشکوئیه و منطقه شهداد. سیمای طیفی هر یک از نمونه‌ها و پاندهای جذبی آن با توجه به ترکیب کانی‌شناسی آن ارائه شده است. نتایج حاصل از اعمال روش CEM نشان داد که این روش، مناطق دارای کانی‌های هالیت، زیمیس و نتاردیست را به خوبی پارز می‌سازد؛ اما در مورد کانی کلسیت، تفکیک به خوبی انجام نمی‌شود که دلیل آن اختلاط زیاد این کانی با سایر کانی‌هاست. با وجود این، با توجه به بازتاب طیفی کمتر کانی کلسیت نسبت به کانی‌های هالیت و زیمیس، تا حدودی می‌توان تفکیک را انجام داد.

کلیدواژه‌ها: استان کرمان، پارزسازی کانی‌های تبخیری، روش کمیته‌سازی انرژی مفید (CEM)، مطالعه طیفی.

مقدمه

کانی‌های صنعتی غیرفلزی نظیر ذخایر بوراکس، لیتیم و پتاس از نظر مبادلات تجاری، بسیار گسترده و از نظر قیمت خام در اغلب موارد ارزان‌تر از کانی‌های فلزی فرآوری می‌شود و تأثیر شگرفی بر اقتصاد کشور دارد. در اقتصاد روز دنیا، مطالعه پلایاها از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است، چرا که بسیاری از منابع معدنی ارزشمند از جمله سولفات و کربنات سدیم و پتاسیم، گچ، نمک طعام، نیترات‌ها، بورات‌ها، همچنین تعدادی از فلزات کمیاب و ارزشمند مانند لیتیم، روبیدیم، سزیم و حتی اورانیم و برخی دیگر از فلزات کمیاب در این محیط‌ها تشکیل و یا انباشته می‌شود. کشور ایران دارای تعداد زیادی پلایا، شورابه، گنبد و کفه نمکی (در حدود ۶۰ کفه نمکی) است، و اهمیت اکتشاف و بررسی ذخایر و پتانسیل‌های معدنی تبخیری‌ها بر کسی پوشیده نمی‌ماند. به‌منظور شناسایی موقعیت قرارگیری پلایاها که عموماً در مناطق با شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک و خشن تشکیل می‌شود، بهتر آن است که با استفاده از علم روز دنیا، از ابزارها و روش‌هایی استفاده شود که بتوان با سهولت بیشتری اقدام به بررسی این نوع محیط‌ها کرد.

سنجش از دور علمی است نوین که می‌توان از آن در تسهیل امور پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی استفاده کرد، به‌خصوص در مواردی که دسترسی به آن‌ها سخت است. مطالعه کانسارهای نمک از آن جهت مشکل است که کانی‌های تبخیری شامل محدوده وسیعی از کانی‌ها با ترکیب‌های شیمیایی نزدیک به هم با ظاهری مشابه است و همین امر تفکیک این کانی‌ها را در صحرا مشکل می‌سازد. علاوه بر آن، این نوع مواد معدنی، در صورت تشکیل، محدوده وسیعی از سطح زمین را می‌پوشاند و وسعت این مناطق، دسترسی کامل به این مواد را محدود می‌سازد، حتی اگر بتوان با نمونه‌برداری بسیار زیاد بر این مشکل فائق آمد. روش‌های مرسوم و متداول مطالعه کانی‌های حوضه‌ای تبخیری تنها بخش کوچکی از مطالعه این سیستم‌ها را پوشش می‌دهد. از این روی، استفاده از روش‌های جدید نظیر روش‌های سنجش از دور و بررسی طیف انواع کانی‌های موجود در این حوضه‌ها بسیار راهگشاست و بسیاری از مشکلات را از میان برمی‌دارد. شناسایی انعکاس طیفی پدیده‌ها در سنجش از دور اهمیت زیادی دارد، چرا که کانی‌های مختلف، نمودها یا سیماهای طیفی مشخص و مختص به خود را دارد و این نمودها کلیدی برای شناسایی این کانی‌ها از طریق فناوری سنجش از دور به‌شمار می‌آید. از این روی، تهیه کتابخانه‌ای طیفی از کانی‌های تبخیری در استان پهناوری مانند کرمان که استانی است کویری و دارای پلایاهای متعدد، زمینه‌ای مناسب برای مطالعه و شناسایی محل تشکیل کانی‌های تبخیری با استفاده از روش سنجش از دور فراهم می‌کند که بر پایه طیف این نوع کانی‌ها عمل می‌کند.

در دهه‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری برای به نقشه درآوردن نمک و شوری سطحی خاک‌ها با استفاده از سنجش از دور صورت گرفته است که هر کدام از این مطالعات، اثربخشی روش‌های مختلف سنجش از دور در تفکیک و بارزسازی این ماده معدنی را ارزیابی می‌کند (برای مثال، کراولی، ۱۹۹۳؛ سیلاج و همکاران، ۱۹۹۳؛ بریانت، ۱۹۹۶؛ گوسنس و ونرنست، ۱۹۹۸؛ علوی‌پناه، ۲۰۰۰؛ علوی‌پناه و همکاران، ۲۰۰۴؛ آرتان، ۲۰۰۸؛ مارتینز - موتویا و همکاران، ۲۰۱۰؛ آرتان و سوزان، ۲۰۱۱؛ آریاواش، ۲۰۱۶؛ سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷).

از میان محققانی که طیف کانی‌های تبخیری را بررسی کرده‌اند می‌توان به هانت و سالیزبری (۱۹۷۰) اشاره کرد که از نخستین محققانی‌اند که اقدام به ثبت و بررسی طیف کانی‌های تبخیری کردند. این محققان دریافته‌اند که جذب‌های موجود در طیف کانی‌های تبخیری به ارتعاش درونی و برانگیختگی شدید گروه‌های آنیونی از جمله SO_4^{2-} ، CO_3^{2-} ، OH، O-H-H مربوط است.

کراولی (۱۹۹۱) در مطالعه خود طیف‌های ۳۵ کانی تبخیری را که همگی در پلایاها یافت می‌شود در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (۲۴۰۰-۴۰۰ نانومتر) طیف الکترومغناطیس ثبت کرد. سیلاج و همکاران (۱۹۹۳) طیف‌های بازتابی خاک‌های شور مربوط به نمونه‌هایی از کالیفرنیا و مجارستان را مطالعه کردند و بر اساس آن، محدوده‌های موجود در طیف الکترومغناطیس را مشخص کردند که می‌توان از آن به‌عنوان کلید اکتشافی در مطالعات خاک‌های شور استفاده کرد. این محدوده‌ها عبارت است از طول موج ۵۵۰-۷۷۰ نانومتر برای باندهای مرئی، طول موج‌های ۹۰۰-۱۰۳۰ نانومتر و ۱۲۷۰-۱۵۷۰ نانومتر برای باندهای مادون قرمز نزدیک و طول موج‌های ۱۹۴۰-۲۱۵۰ نانومتر، ۲۱۵۰-۲۳۰۰ نانومتر و ۲۳۳۰-۲۴۰۰ نانومتر برای باندهای مادون قرمز میانی.

ماژونت و همکاران (۱۹۹۳) ویژگی‌های طیفی کانی‌های تبخیری کلر و سولفاتدار را بررسی و ویژگی‌های این کانی‌ها را از نظر جذب و بازتاب در قسمت‌های مختلف موج الکترومغناطیس گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که باندهایی از تصاویر ماهواره‌ای که در ناحیه مادون قرمز میانی امواج الکترومغناطیس واقع می‌شود اطلاعاتی در مورد میزان نمک موجود در خاک‌های شور فراهم می‌کند. دریک (۱۹۹۵) ضمن مرور کارهای قبلی در زمینه بررسی خاک‌های شور و کانی‌های نمک، کاربردهای طیف‌سنجی در مطالعه کانسارهای تبخیری را بیان کرد. این محقق از طیف‌های آزمایشگاهی برای نشان دادن تأثیر ازدست‌دادن آب کانی‌های تبخیری بر طیف حاصل از این کانی‌ها استفاده کرد.

هاواری و همکاران (۲۰۰۲) به‌منظور بررسی تأثیر ترکیب نمونه‌های مرکب روی طیف‌های ثبت‌شده از این کانی‌ها، آزمایش‌هایی را ترتیب دادند که شرایط حاکم بر این کانی‌ها چنان تحت کنترل قرارگیرد که بتوان آثار ناشی از تغییر ترکیب روی طیف کانی یا به‌عبارت بهتر تأثیر ترکیب روی محل و شدت جذب و بازتاب در طیف ثبت‌شده را بررسی کرد. این محققان طیف کانی‌های هالیت، ژیس، بی‌کربنات کلسیم و بی‌کربنات سدیم و ترکیب آن را مطالعه کردند.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی ویژگی‌های طیفی کانی‌های تبخیری موجود در پلایاهای استان کرمان به‌منظور استفاده در آنالیز داده‌های دورسنجی در نقشه‌برداری کانی‌های تبخیری و ایجاد کتابخانه‌ای طیفی برای کانی‌های تبخیری موجود است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای اندازه‌گیری طیف نمونه‌ها از دستگاه اسپکترورادایومتر نوع ASD Field Spec3® در آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان استفاده شد. این دستگاه قابلیت ثبت طیف در محدوده ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر را داراست و دارای ۲۱۵۱ باند در این محدوده است. طیف نمونه‌ها در اتاقک کاملاً تاریکی اندازه‌گیری شد که در آن از نور مصنوعی لامپ هالوژن تنگستن برای تولید موج الکترومغناطیس تابشی استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان بازتاب، نخست طیف جسم سفید مرجع^۱ که بازتاباننده لامبرتن واقعی است، برای استاندارد کردن دستگاه اندازه‌گیری شد و این عمل برای هر سه تا پنج نمونه تکرار شد و بازتاب طیفی با رزولوشن بالای نمونه‌ها در محدوده ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر موج الکترومغناطیس ثبت گردید. منحنی‌های طیفی ثبت‌شده برای تصحیح نوفه‌های احتمالی با نرم‌افزار PimaView تصحیح شد.

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، تصاویر سنجنده ASTER در سطح 1T مربوط به فصل تابستان است. این سنجنده با ناحیه برداشت طیفی وسیعی متشکل از چهارده باند از محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک (۵۲-۰/۸۶ میکرومتر)، مادون قرمز کوتاه‌موج (۴۳-۲/۶۰ میکرومتر) و مادون قرمز حرارتی (۶۵-۱۱/۱۲ میکرومتر) و به ترتیب با قدرت تفکیک مکانی ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر است. به‌منظور بررسی‌های بعدی با استفاده از این تصاویر، نه باند از مجموع چهارده باند این تصاویر با یکدیگر ترکیب شد که این نه باند عبارت است از سه باند مرئی و شش باند مادون قرمز نزدیک کوتاه‌موج که قدرت تفکیک مکانی این باندها یکسان و برابر ۳۰ متر قرار داده شد.

پردازش تصاویر رقومی ماهواره‌ای به‌طور کلی به دو مرحله اصلی پیش‌پردازش و پردازش یا بازسازی تصویر تقسیم می‌شود. تصحیح جوی به‌منظور از بین بردن تأثیر جو در پراکنش امواج عبوری ضروری است. تصحیح هندسی نیز جهت از بین بردن کژدیسی‌های تصاویر رقومی به‌کار برده می‌شود. تصاویر سطح 1T مورد استفاده در این پژوهش دارای تصحیح هندسی است و تنها تصحیح جوی روی آن انجام شد. برای انجام تصحیح جوی از روش Internal Average Reflectance (IAR) یا به عبارتی روش بازتاب میانگین درونی و به‌منظور پردازش تصاویر از نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. برای مشخص کردن طول‌موج‌های جذبی روی منحنی‌های طیفی ثبت‌شده از روش حذف پیوستار^۲ استفاده شد. برای شناخت رفتار طیفی کانی‌های تبخیری در محدوده باندهای ASTER، این طیف‌ها بر اساس طول‌موج‌های باندهای این سنجنده بازنویسی شد. بازسازی عوارض مختلف با استفاده از تصاویر رقومی و روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است و همان‌طور که ذکر کردیم، در این پژوهش از روش کمپن‌ساز انرژی مقید (CEM)^۳ استفاده شد. در بررسی صحت نتایج این روش، نقشه‌های حاصل با نتایج داده‌های زمینی مقایسه شد. نقاط نمونه‌برداری روی نقشه‌های زمین‌شناسی (شکل ۱ تا ۴) مشخص شده است. در مجموع، صد نمونه برداشت شد. به‌منظور بررسی دقیق کانی‌شناسی نمونه‌ها، پس از آماده‌سازی، تعداد ۳۶ نمونه از مجموع نمونه‌های برداشت‌شده برای انجام آزمایش XRD، به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال شد.

باندهای جذبی طیف مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی کانی‌های تبخیری به میزان بالایی با ارتعاش درونی و برانگیختگی شدید گروه‌های آنیونی SO_4^{2-} ، CO_3^{2-} ، OH ، HOH در ارتباط است (هانت و سالیزبری، ۱۹۷۰، ۱۹۷۱). کراولی (۱۹۹۱) معتقد است که در مورد کانی‌های تبخیری، فرایندهای ارتعاش درونی نسبت به فرایندهای الکترونی اهمیت بیشتری دارد. در بررسی سیماهای طیفی کانی‌های تبخیری، مولکول آب و اجزای تشکیل‌دهنده آن نقش مهمی ایفا می‌کند. مولکول آب به پنج شکل در کانی‌ها حضور دارد: ۱. به‌صورت جذبی در سطح کانی‌ها، ۲. حضور در اذخاها

1. white reference
2. continuum removal
3. Constrained Energy Minimization

یا میانبارهای سیال کانی‌ها، ۳. در سطوح ضعف ساختار کانی‌ها مانند سطوح رخ، ۴. آب موجود در کانال‌های غیرساختاری کانی‌ها که به آب زئولیتی نیز مشهور است، ۵. آب ساختاری که در واقع جزئی از ساختمان کانی را تشکیل می‌دهد (هانت و سالیزبری، ۱۹۷۱).

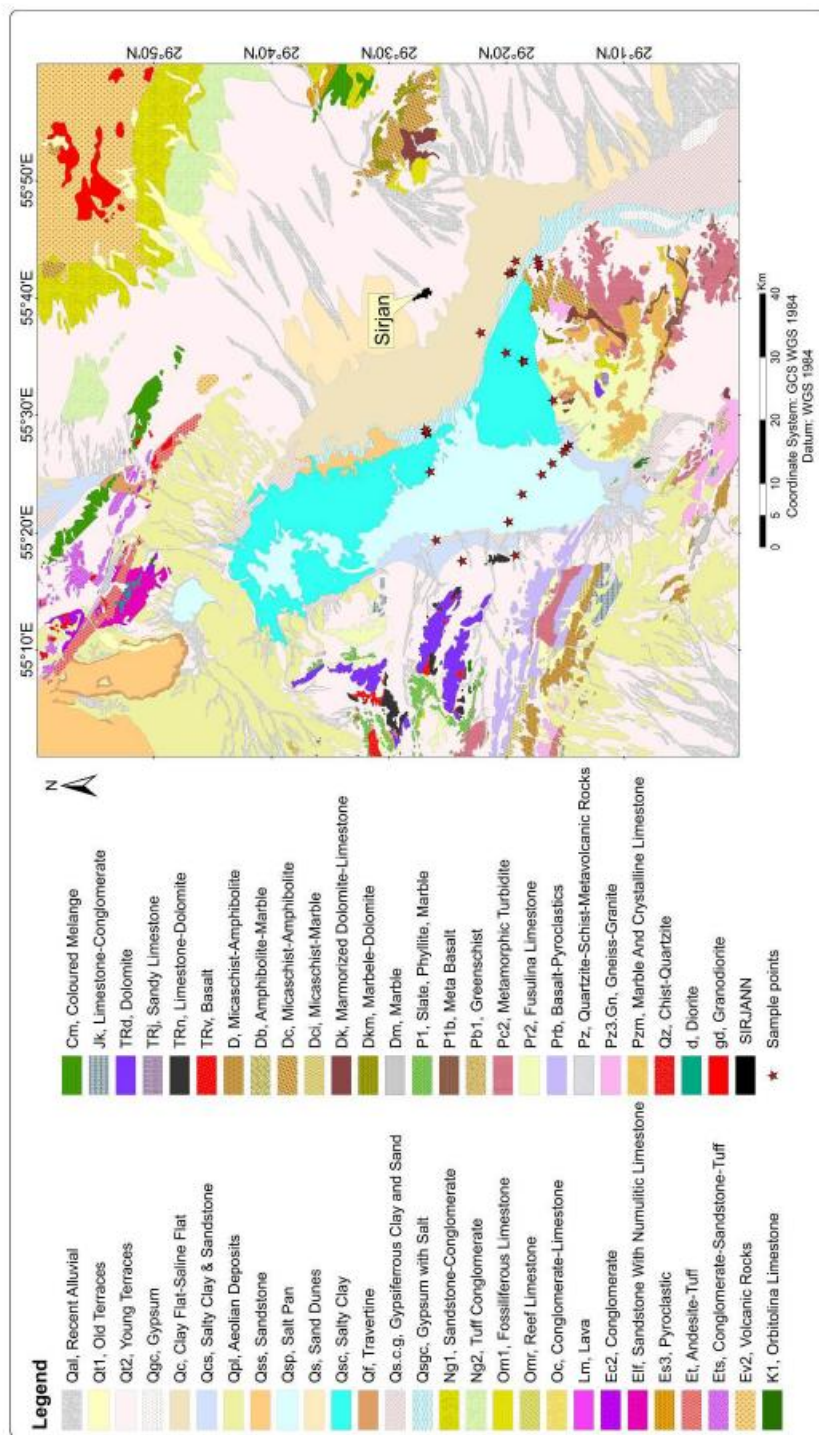
دریک (۱۹۹۵) جذب‌های موجود در طول موج حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ را مربوط به سه نوع نخست آب موجود در کانی‌ها می‌داند و جذب‌های رخ داده در طول موج‌های ۲۵۰۰ نانومتر را به دو نوع آخر آب موجود در کانی‌ها یا به عبارتی آب‌های ساختاری نسبت می‌دهد. هالیت خالص در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک، و مادون قرمز حرارتی فاقد سیمای مشخص است و دلیل آن هم نبود هیچ یک از گروه‌های آنیونی ذکر شده است. اما، از آنجاکه یکی از ویژگی‌های طبیعی نمک، جذب آب بالای آن است، همواره مقداری رطوبت با آن وجود دارد و همین رطوبت موجب می‌شود که این کانی، جذب‌های مشخصی را در محدوده‌های جذب آب غیرساختاری یا به عبارتی محدوده‌های با طول موج ۱۴۰۰، ۱۹۰۰، ۲۲۵۰ نانومتر نشان دهد. علاوه بر این، طیف هالیت خالص میزان بازتاب بالایی را نشان می‌دهد. کانی‌های تبخیری حاوی بنیان کربنات (CO_3^{2-}) در طیف بازتابی الکترومغناطیس خویس، سیمای جذبی‌ای را به نمایش می‌گذارد که ناشی از ارتعاش این بنیان است. برای مثال، کانی کلسیت معمولاً هفت سیمای جذبی در محدوده طیفی بالاتر از ۱۶۰۰ نانومتر است که این هفت باند جذبی عبارت است از ۱۷۶۳، ۱۸۷۶، ۱۹۹۱، ۲۱۶۷، ۲۲۶۱، ۲۳۳۳ و ۲۵۳۵ نانومتر (کافی، ۱۹۸۶). از آنجاکه کشور ایران دارای مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیاری است و این مناطق مستعد تشکیل تبخیری‌هاست، محققان بسیاری روش‌های مختلف سنجش از دور را در راستای به نقشه درآوردن این عوارض به کار برده‌اند (هاشمی تنگستانی و دهقان طزره، ۱۳۷۴؛ میرزاخانی و عسگری، ۱۳۹۱؛ قهرودی‌تالی، ۱۳۹۰؛ تقی‌زاده و همکاران، ۲۰۰۸؛ رضایی مقدم و همکاران، ۲۰۰۶؛ علوی‌پناه و همکاران، ۲۰۱۱؛ خلیلی و صفاری، ۲۰۰۲؛ علوی‌پناه و پویافر، ۲۰۰۵؛ زهتابیان و همکاران، ۲۰۰۲؛ رنجبر، ۱۳۸۷؛ و سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷).

تحقیقات پیشین درباره تبخیری‌های مناطق مختلف ایران بازگوکننده کارآمد بودن روش‌های مختلف سنجش از دور برای به نقشه درآوردن این دسته از مواد معدنی است. در این پژوهش، روش کمینه‌سازی انرژی مقید که در پژوهش‌های قبلی استفاده نشده است، به منظور بررسی کارایی این الگوریتم در بارزسازی کانی‌های تبخیری ارزیابی شده است. در این الگوریتم، بر اساس بردار عارضه مورد نظر (d)، فیلتری طراحی می‌شود (w) که بعد از اعمال آن روی تصاویر چند طیفی و ابرطیفی، تصویری به دست می‌آید که در آن پیکسل‌های مشابه با عارضه آشکارتر شده است. مقادیر هر پیکسل در تصویر نهایی محاسبه می‌شود (فارند و هرسانی، ۱۹۹۷).

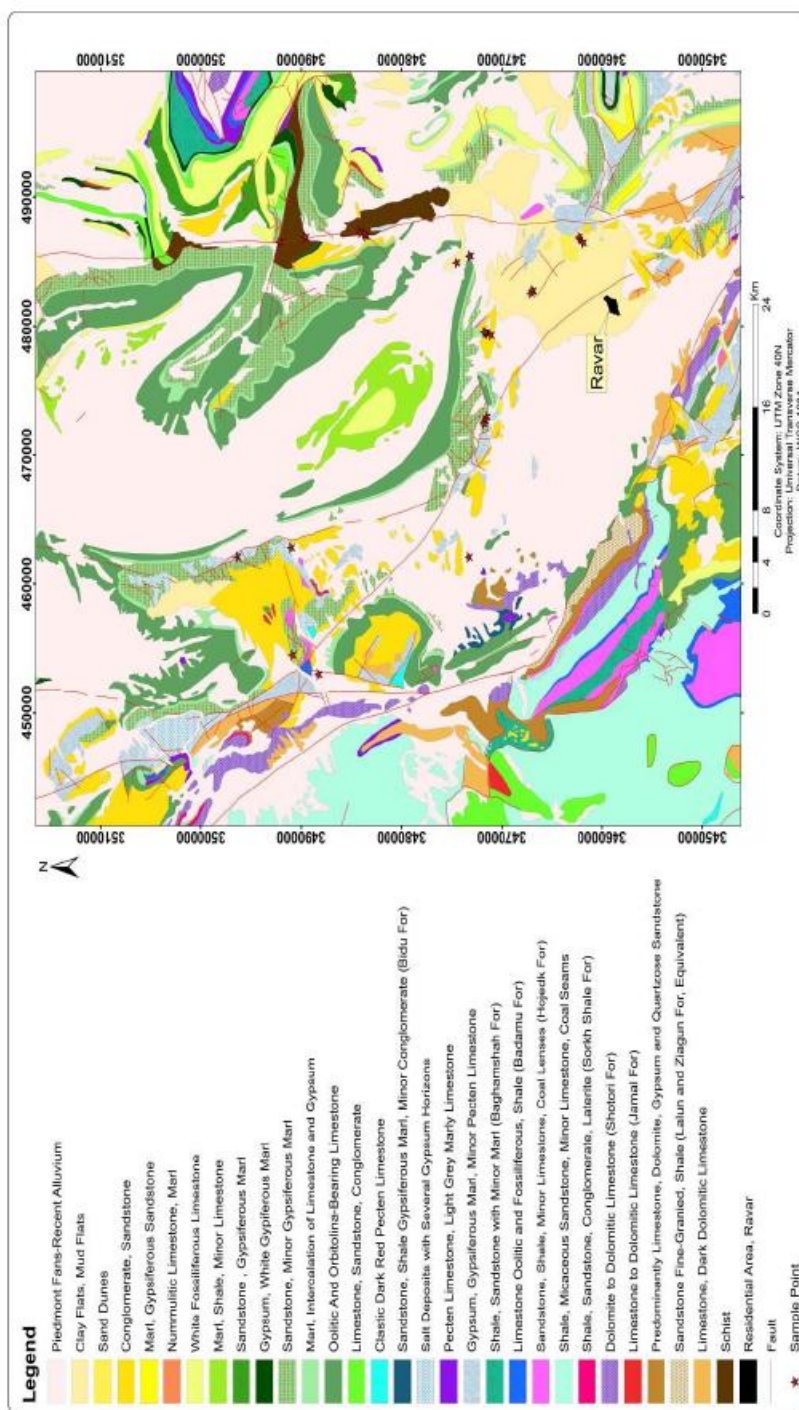
$$y_i = \sum_{l=1}^L w_l r_{il} = w^T r_i \quad w = \frac{R_L \times L^{-1} d}{d^T R_L \times L^{-1} d}$$

در روابط فوق، r مجموعه تصاویر ورودی، y تصویر نهایی، R ماتریس خودهمبستگی تصاویر ورودی و L تعداد باندهای تصویر است. در تصویر نهایی هر چه مقادیر پیکسل به مقدار ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر وجود موادی شبیه به عارضه مورد نظر در این پیکسل است.

این روش، با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به سیگنال مطلوب، بدون اینکه در مورد دیگر سیگنال‌ها، از جمله سیگنال‌های نامطلوب و مزاحم، اطلاعاتی داشته باشد، اثر آن را کمینه می‌کند. پس این روش نسبت به روش‌های نظارت‌نشده این برتری را دارد که نیازی به دانش اولیه از تعداد سیگنال‌های مزاحم نیست. در کل می‌توان روش CEM را روشی نیمه‌نظارت‌شده به‌شمار آورد که تنها از اطلاعات هدف استفاده می‌کند و قید تعریف‌شده را بر جهت بردارهای پیکسلی می‌گذارد (چانگ و هینز، ۲۰۰۰).



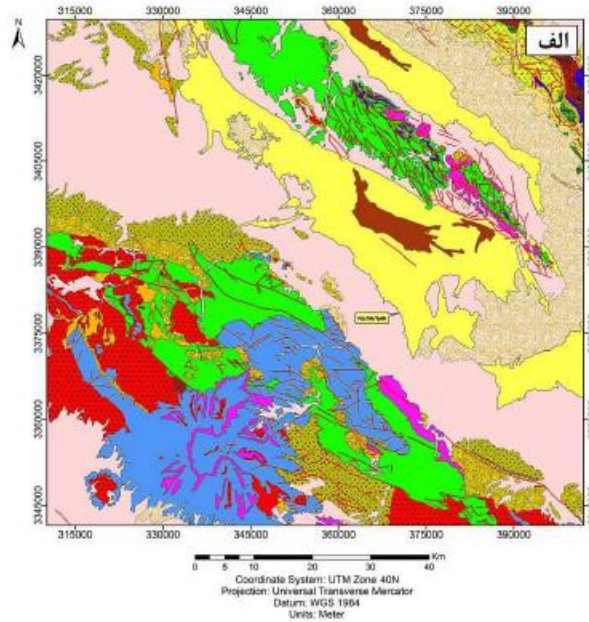
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی سیرجان (با اندکی تغییرات از دیمیتریویچ و همکاران، ۱۹۷۱؛ اترافی و روش‌ن‌روان، ۱۳۳۳؛ روش‌ن‌روان و همکاران، ۱۳۷۵؛ سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۷۶)



شکل ۳. نقشه زمین شناسی منطقه مطالعاتی راور (حاج بلاعی، ۱۳۷۴)

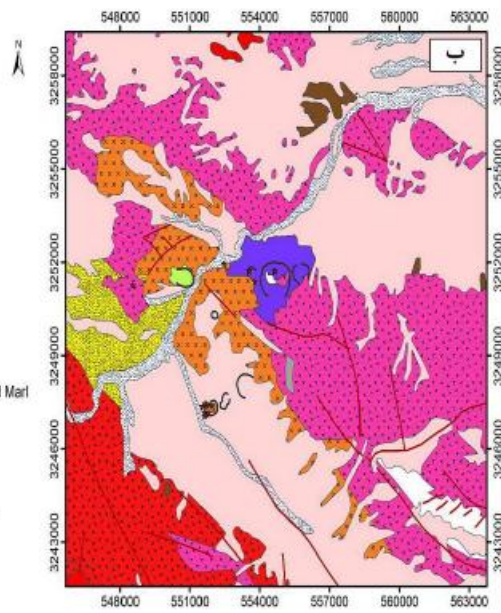
Legend

- Recent Alluvial & River Deposits
- Old Terraces
- Sand Dunes
- Mud Flat
- Silt & Clay
- Dasht
- Conglomerate-Sandstone
- Sandstone-Conglomerate-Limestone-Marl
- Limestone-Marl-Sandy Limestone
- Basalt-Andesite-Dacite Rocks
- Pyroclastics
- Trachyandesite-Volcanic-Conglomerate
- Granodiorite
- Rhyolite-Dacite-Tuff
- Flysch
- Marl-Conglomerate-Gypsiferous
- Orbitolina Limestone
- Shale-Sandstone-Limestone
- Dolomite-Limestone-Shale
- Sandstone-Sandy Shale-Sandy Limestone
- Fault

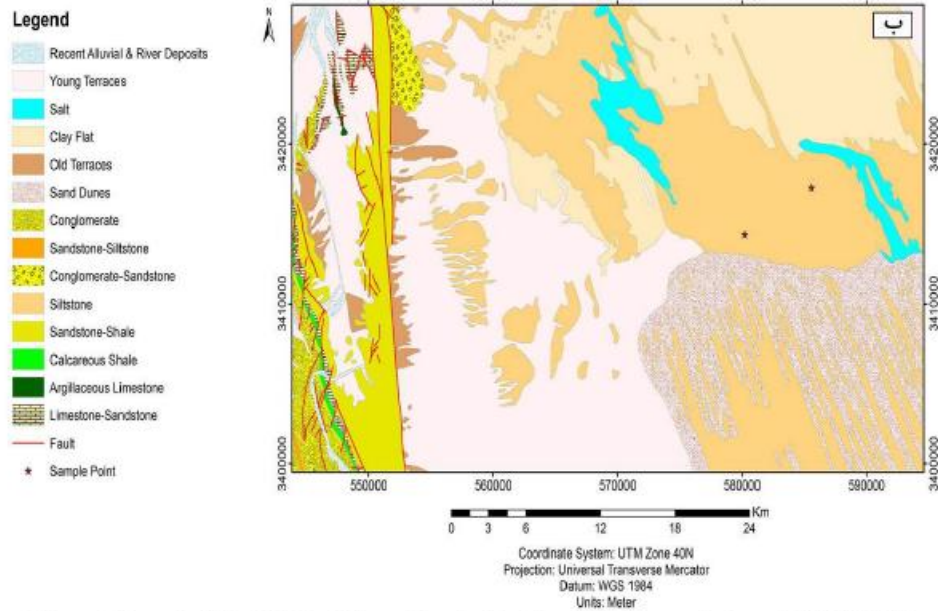
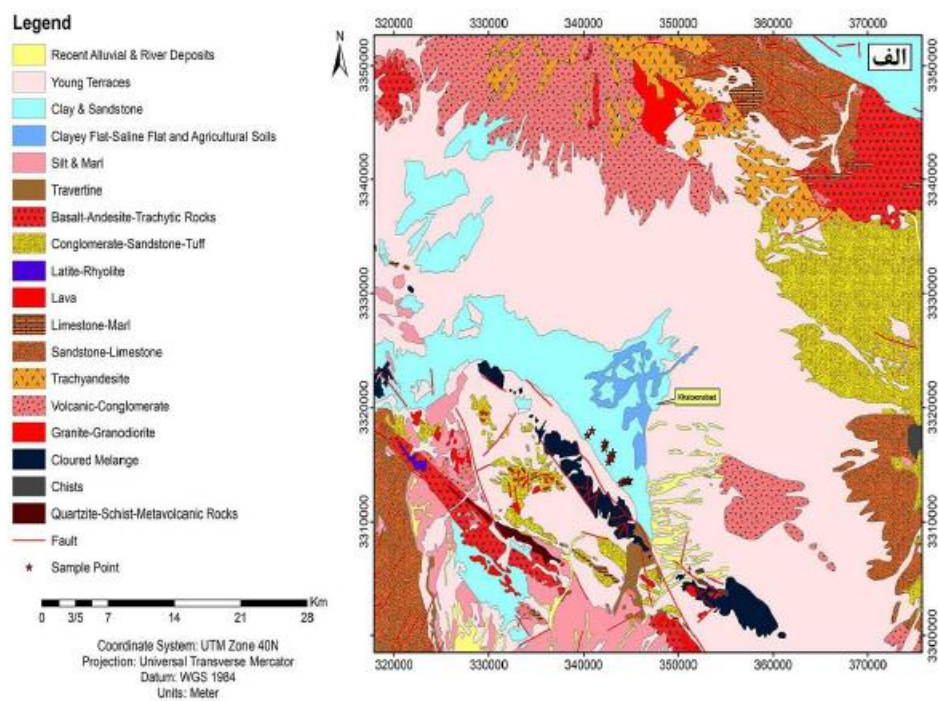


Legend

- Alluvium in Stream Channels
 - Younger Gravel Fans
 - Impact Crater
 - Travertine
 - Granodiorite
 - Conglomerate, Poorly Lithified With Scarce Sandstone
 - Agglomerate and Tuffaceous Sandstone
 - Tuff, Rhyolitic and Tuffaceous Sandstone
 - Rhyodacite with Pyroclastics and Agglomerate
 - Andesite-Basalt with Tuff Interlayers
 - Siltstone, Grey with Subordinate, Greywacke, Microconglomerate and Marl
 - Fault
 - Crater
 - * Sample Point
- 0 1/5 3 6 9 12 Km
 Coordinate System: UTM Zone 40N
 Projection: Universal Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Units: Meter



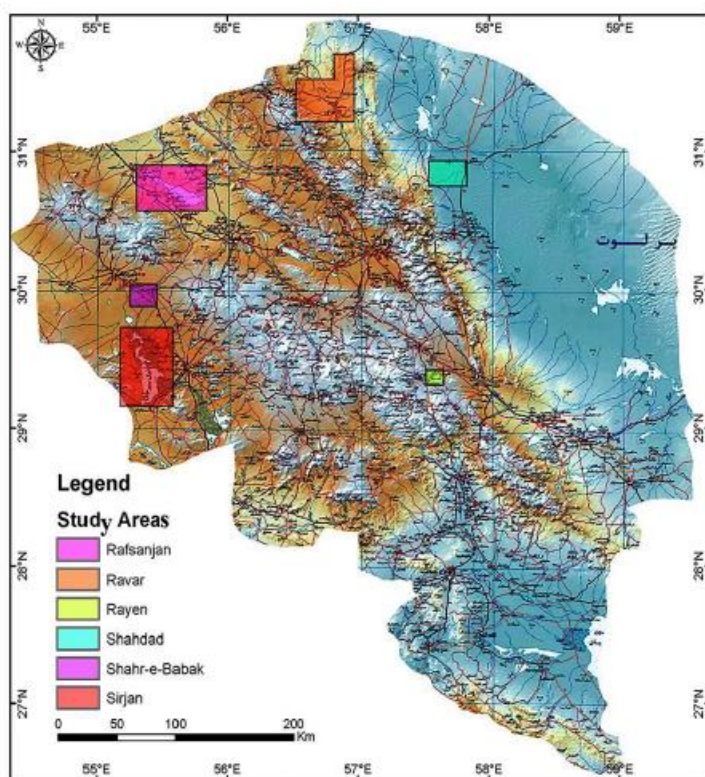
شکل ۳. الف) نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی کنسکونیه (ناظم‌زاده شعاعی و عزیزان، ۱۳۵۲)، ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی رابن (جوکوویچ و حالوباتی، ۱۹۷۲)



شکل ۴. الف) نقشه زمین شناسی منطقه مطالعاتی خاتون آباد (سردیک و همکاران، ۱۹۷۱)، ب) نقشه زمین شناسی منطقه مطالعاتی شهداد (سهندی، ۱۳۷۴)

راه‌های دسترسی به مناطق مطالعاتی و زمین‌شناسی آن مناطق مورد مطالعه در این پژوهش در جنوب شرقی ایران و در استان کرمان واقع شده است. در ادامه به‌طور خلاصه به زمین‌شناسی آن اشاره می‌کنیم.

۱. پلایای سیرجان در جنوب غربی شهرستان کرمان و غرب شهرستان سیرجان قرار گرفته است. جاده‌های سیرجان-نیریز و سیرجان-شهربابک از مهم‌ترین راه‌های ارتباطی این منطقه است (شکل ۱). این پلایا بزرگ‌ترین و مهم‌ترین پلایای استان کرمان است و در فروافتادگی تکتونیکی‌ای واقع شده است که از شمال به ارتفاعات ارومیه دختر، از جنوب و غرب به ارتفاعات سنندج-سیرجان و از شرق به دشت سیرجان محدود می‌شود (شکل ۲). کمربند ارومیه دختر به‌طور عمده از تشکیلات آتشفشانی انوسن و سنگ‌های رسوبی و مجموعه دگرگونی زون سنندج سیرجان تشکیل شده است که عمدتاً به پالئوزوییک و اوایل مزوزوییک تعلق دارد. از جمله سنگ‌های مختلف دگرگونی آن عبارت است از میکاشیست، گنیس، آمفیبولیت، مرمر، گرین شیست و دولومیت. قدیمی‌ترین تشکیلات کواترنری این ناحیه را واحدی به نام Q^1 تشکیل می‌دهد که از مارن، مارن گچدار، سیلت و کمی کنگلومرا تشکیل شده است. رسوبات جوان‌تر موجود در منطقه از فرسایش رسوبات قبلی به‌خصوص رسوبات پلیستوسن به‌وجود آمده است.



شکل ۵. راه‌های دسترسی به مناطق مورد مطالعه (نقشه راه‌های ایران، انتشارات جیناژشناسی، ۱۳۸۷)

۲. تبخیری‌های منطقه راور در شمال، شمال غربی و غرب شهر راور مطالعه شد. برای دسترسی به این محدوده از جاده کرمان-راور-خراسان استفاده می‌شود (شکل ۱). نهشته‌های موجود در این منطقه، بیشتر شامل رسوبات مزوزوییک به‌ویژه نهشته‌های ژوراسیک پسین-کرتاسه است (اشتوکلین و همکاران، ۱۹۷۲) شامل ماسه‌سنگ و سیلتستون با

میان لایه‌های میکروکنگلومرا تا کنگلومرا (لایه‌های سرخ‌گره دو (JK) که واحدهای نمک ژوراسیک بالا (Jm) را پوشانده است (آقائباتی، ۱۳۸۳: ۱۴۹) و با واحد تبخیری مارن گچدار و گچ (K¹¹) و سنگ آهک خاکستری ستبر لایه کرتاسه (K¹) پوشیده می‌شود. گسترده‌ترین نهشته‌های گچی ژوراسیک ایران مرکزی (گچ مگو (Jm)) یکی از واحدهای مهم این منطقه است. جوان‌ترین رسوبات کواترنری منطقه شامل آبرفت بستر رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی، رسوبات کوهپایه‌ای، کفه‌های رسی کمی گچدار، پهنه‌های پوشیده از ماسه‌بادی و کفه‌های نمکی و گچدار (واحدهای Q¹، Q²، Q³، Q⁴، Q⁵) است (شکل ۳).

۳. تبخیری‌های کفه کسکوئیه در شمال غربی رفسنجان قرار دارد. جاده کرمان-رفسنجان-یزد راه دسترسی به این محدوده است (شکل ۱). این کفه از شرق به ارتفاعات بدبخت کوه و از غرب به ارتفاعات ارومیه دختر محدود می‌شود. در مورد زمین‌شناسی کمربند ارومیه دختر مواردی ذکر شد. کمپلکس آتشفشانی رسوبی بدبخت کوه عمدتاً از فلیش‌های کرتاسه بالا (تناوبی از کالکارنایت و شیل) و مجموعه سنگ‌های آتشفشانی دوران سوم تشکیل شده است. کنگلومرای کرمان (KPC) در نقشه کسکوئیه و Kc در نقشه انار) با دگرشیبی روی فلیش‌های کرتاسه قرار گرفته است. این مجموعه به‌صورت ناودیس بزرگی در حاشیه شرقی کفه واقع شده است. رسوبات کواترنری شامل سیلت ماسه‌ای، لوم رسی همراه با یولکسیت، سیلت ریزدانه همراه با بدون یولکسیت، رس سیلتی، گچ همراه با یولکسیت، لوم ماسه‌ای، پهنه ماسه‌ای، تلماسه و پهنه رسی همراه با نمک است (شکل ۴الف).

۴. تبخیری‌های رایین در جنوب شرقی شهر رایین و در محل کراترهای موجود در اطراف روستای قلعه حسنعلی و توتک بالا مطالعه شد. دسترسی به این محدوده از طریق جاده کرمان-رایین-درب بهشت میسر است (شکل ۱). واحدهای اصلی موجود در منطقه کراترها بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خانۀ خاتون (چوکویچ و حالویاتی، ۱۹۷۲) عبارت است از واحدهای انوسن تا الیگوسن که بیشتر در کوه زاغ و کوه‌های غرب و شمال دهکده قلعه حسنعلی رخنمون دارد و به سه واحد پایینی، میانی و بالایی تقسیم شده است. واحد پایینی از گدازه‌های ریوداسیتی و داسیتی، آگلومرا و توف آندزیتی و ماسه‌سنگ توفی تشکیل شده است. واحد میانی که به آن مجموعه هزار نیز گفته می‌شود عمدتاً از آندزیت، بازالت، آندزیت بازالت و واحد بالایی عمدتاً از سنگ‌های رسوبی و کمی سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است. رسوبات کواترنری نیز شامل رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای، مخروط‌افکنه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی، کفه‌های رسی و آبرفت‌های جوان و پادگانه‌های آهکی است (شکل ۴).

۵. کفه خاتون آباد در غرب شهرستان کرمان و ۳۱ کیلومتری جنوب شرق شهرستان شهرابک واقع شده است. برای دسترسی به این محدوده، می‌توان از جاده‌های سیرجان-شهرابک، رفسنجان-شهرابک و انار-شهرابک استفاده کرد (شکل ۱). این کفه در فرافتادگی تکنونیک واقع شده است که از جنوب با کوهستان‌های کم‌ارتفاع جنوب شرق شهرابک و از شمال با کوهستان‌های مرتفع مساحیم و مدوار محدود می‌شود. قدیمی‌ترین واحد در محدوده مطالعاتی خاتون آباد، فلیش‌های با سن انوسن است. ارتفاعات شمال منطقه عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و آذرآواری انوسن تشکیل شده است. قدیمی‌ترین نهشته‌های کواترنری در این ناحیه را لس‌ها، سیلت‌ها و مارن‌ها تشکیل می‌دهد (Q¹). روی این واحد تراورتن و سنگ‌آهک‌های آب شیرین تشکیل شده است (Q²). جوان‌ترین رسوبات کواترنری منطقه نیز رسوبات بستر رودخانه‌ها و رسوبات ته‌نشین شده در بستر پالایاست (شکل ۵الف).

۶. تبخیری‌های مربوط به منطقه شهداد در شمال شرق شهر شهداد مطالعه شد. دسترسی به این محدوده از طریق جاده کرمان-شهداد میسر است (شکل ۱). تقریباً تمامی آب‌های سطحی غرب شهداد با رودخانه‌هایی مانند شیرین‌رود، رودخانه دهنه غار، رودخانه خرشکن و رودخانه شهداد به سوی کویر لوت جریان پیدا می‌کند. ارتفاعات غرب منطقه که منشأ عمده رسوبات در منطقه مورد مطالعه است، از سنگ‌هایی با دامنه سنی پالئوزوئیک تا کواترنری تشکیل شده است. از جمله سازندهای منطقه می‌توان به سازند زاگون، لالون، سازند کوهبنان، سازند جمال، دولومیت ستبری، سازند بادامو و سازند هجدک اشاره کرد. رسوبات کواترنری منطقه شامل آبرفت مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های قدیمی رودخانه‌ها (Q¹) و آبرفت مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های رودخانه‌ای جوان تر (Q²) است (شکل ۵ب).

یافته‌های پژوهش

مطالعات طیف‌نگاری و کانی‌شناسی

در این پژوهش سیمای طیفی نمونه‌های برداشت‌شده، پس از تصحیح، بررسی و باندهای جذبی آن مشخص شد. جدول ۱ باندهای جذبی نمونه‌ها به همراه ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها را نشان می‌دهد. پس از بازنویسی طیف‌ها بر اساس باندهای تصاویر سنجنده ASTER محل باندهای جذبی هر یک از نمونه‌ها روی طیف‌های بازنویسی‌شده نیز مشخص شد (جدول ۱). به‌منظور سهولت در مطالعه کانی‌های تبخیری مناطق مطالعاتی، با استفاده از نتایج حاصل از XRD، کانی‌های تبخیری محدوده‌ها مشخص شد. بر این اساس چهار کانی اصلی، هالیت، ژپس، تناردیت و کلسیت در محدوده‌ها بررسی طیفی شد. علاوه بر کانی‌های یادشده، کانی‌های انیدریت و باسانیت نیز تنها در تعداد محدودی از نمونه‌ها مشاهده شد که این امر مربوط به ناپایداری بودن این کانی‌ها در شرایط محیطی زمان نمونه‌برداری است. بر اساس نتایج XRD نمونه‌ها در جدول ۱، کانی‌های تبخیری پالایای سیرجان شامل هالیت، ژپس، تناردیت و کلسیت و به‌ندرت دولومیت است. از بین این کانی‌ها، کانی هالیت بیشترین فراوانی را به‌خود اختصاص داد و سطحی معادل ۳۶۰ کیلومتر مربع از مجموع ۱۶۲۵ کیلومتر مربع پالایای سیرجان، به ضخامت چند سانتی‌متر تا ۵ متر را دربرمی‌گیرد. این در حالی است که کانی هالیت محدود به کفۀ نمکی نیست و در سایر قسمت‌های پالایای سیرجان، مثل کفۀ رسی نمکی و حتی در رسوبات دامنه کوه‌های محصورکننده و مخروط‌افکنه‌ها نیز وجود دارد. بخش عمده پالایا، از رس تشکیل شده است. کانی‌های تخریبی عمده پالایای سیرجان شامل کوارتز (به‌وفور)، کریستوبالیت (به‌ندرت)، آلیت، کلینوکلر، موسکویت، ارتوز و کانی‌های رسی است. کانی‌های رسی شامل کانولینیت، ایلیت و پیروفیلیت است. ایلیت در تعداد نمونه‌های بیشتری مشاهده شده است. کانی پیروفیلیت فراوانی کمتری دارد و با توجه به‌وفور این کانی در منشأهای دگرگونی، می‌توان حضور این کانی را به دگرگونی‌های ستنده سیرجان نسبت داد. از کانی‌های فرعی و تخریبی جالب توجه این پالایا می‌توان به کانی استرانسیانیت (SrCO_3) اشاره کرد که یکی از کانی‌های گروه آراگونیت است و کانی کمیابی محسوب می‌شود. بر اساس نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی، میزان استرانسیم در مناطق تبخیری، از جمله پالایای سیرجان آنومالی بالایی نشان می‌دهد. عنصر استرانسیم بیشتر جایگزین کلسیم می‌شود، اما زمانی که غلظت این عنصر افزایش می‌یابد کانی مستقلی تشکیل می‌دهد. نتایج تجزیه‌های XRD نشان می‌دهد که کانی استرانسیانیت نتیجه افزایش غلظت استرانسیم و وجود مقادیر لازم از CO_3 است. کانی دیگر نادر و موجود در این پالایا، کانی یوکریپتیت^۱ با فرمول $\text{CaMgB}_4\text{O}_6(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ ، آریستارائیت^۲ در پگماتیت‌های غنی از لیتیم یافت می‌شود و جایگزین اسهودومن می‌شود که کانی لیتیم‌دار فراوان‌تری است. این کانی به‌صورت تخریبی وارد پالایا شده است، اما از آنجا که مهم‌ترین ذخیره استحصال لیتیم در دنیا شورابه‌هاست، دور از انتظار نیست که شورابه‌های این پالایا نیز سهمی در تولید لیتیم کشور داشته باشد. اما، این کار مستلزم بررسی‌های سیستماتیکی نوین روی شورابه‌های این پالایاست.

در پژوهش حاضر، نمونه‌برداری از مواد جامد انجام شد. در کفۀ خاتون‌آباد، برخلاف پالایای سیرجان، فراوان‌ترین کانی تبخیری هالیت نیست و کانی‌های تبخیری عمده ژپس و کلسیت است و هالیت در درجه دوم اهمیت قرار دارد. در این منطقه کانی‌های بردار یولکسیت^۳ ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)، بُرکرایت^۴ ($\text{CaB}_3\text{O}_6(\text{OH})_2$)، پُریکرایت^۵ ($\text{CaB}_3\text{O}_6(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) و اینیونیت^۶ ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{B}_9\text{O}_8(\text{OH})_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) در اثر واکنش سیالات گرمایی با پروسیت ایجاد می‌شود. کانی اینیونیت از گروه بورات‌ها، بی‌رنگ و با جلای شیشه‌ای است که در آب حل می‌شود و سختی پایینی دارد (سختی ۲). این کانی به‌صورت درج‌ازا در رسوبات پالایاها تشکیل می‌شود و همراه با کانی‌های بردار دیگر مثل یولکسیت و کلمانیت و ژپس یافت می‌شود. یولکسیت برات سدیم و کلسیم آبداری است به رنگ سفید تا خاکستری روشن با جلای ابریشمی و با سختی ۲/۵ که به مقدار کم در آب حل می‌شود. این کانی در کانسارهای بوراکس تبخیری یافت می‌شود که در دریاچه‌های مناطق خشک تشکیل می‌شود.

1. Eucryptite
2. Ulexite
3. Borcarite
4. Aristaraimite
5. Inyoite

جدول ۱. پاندهای چندی نمونه‌های تیکیری مناطق مطالعاتی استان کرمان

Sample	Area	Minerals	(nm) Absorption wavelength
Sh0-7	Sfjen	Gypsum, Quartz, Calcite, Albite, Chlorohalite, Muscovite	1102 1322 1449 1943 2216 2327 2429
Sh1-7	Sfjen	Halite, Quartz, Calcite, Albite, Muscovite, Chlorohalite	655 889 1332 1415 1551 1523 1674 1793 1929 2224 2286 2332 2348 2395
Us0-7	Sfjen	Halite, Quartz, Calcite, Cristobalite, Chlorohalite, Muscovite	676 891 1174 1424 1660 1720 1925 2212 2251 2323 2365
Us1-7	Sfjen	Quartz, Calcite, Gypsum, Albite, Strontianite, Dolomite, Chlorohalite, Orthoclase, Illite	690 907 1116 1230 1419 1668 1718 1820 1931 2216 2253 2332
Us2-7	Sfjen	Halite, Calcite, Quartz, Gypsum, Illite	977 1109 1445 1795 1945 2216
Us3-7	Sfjen	Halite	982 1215 1445 1945
Us4-7	Sfjen	Calcite, Quartz, Dolomite, Halite, Eucryptite, Chlorohalite, Muscovite	1412 1925 2253 2256
Sh2	Sfjen	Calcite, Quartz, Albite, Chlorohalite, Muscovite, Illite	884 1107 1255 1322 1408 1920 2209 2251 2339
Sh3	Sfjen	Halite, Quartz, Gypsum, Albite, Pyrophyllite, Chlorohalite, Illite	522 1413 1762 1929 2214
Sh7-28	Sfjen	Halite, Quartz, Calcite, Chlorohalite, Albite, Muscovite	1095 1445 1684 1811 1943 2251
Sh8-28	Sfjen	Thesaurite, Quartz, Gypsum	1202 1429 1663 1720 2082 2128 2453
Sh11	Shahdad	Halite, Quartz, Gypsum, Calcite, Basanite, Albite, Orthoclase	1033 1174 1450 1762 1952 2221
Sh13	Shahdad	Halite, Gypsum, Quartz, Calcite	1165 1434 1786 1927 2210
Rn1	Reyen	Halite, Quartz	982 1104 1246 1428 1702 1807 1945
Rn11	Reyen	Thesaurite, Quartz, Calcite, Cristobalite, Muscovite, Gypsum, Albite	1049 1176 1387 1420 1660 1730 1918 2071 2258 2464
Rn5	Reyen	Calcite, Quartz, Chlorohalite, Diopside, Illite, Alunite, Muscovite, vanadinite baran	1329 1408 1684 1774 1920 2210 2284 2330
R19	Ravar	Halite, Quartz, Gypsum, Calcite, Albite, Chlorohalite, Boracite, Illite	889 1028 1417 1628 1929
R20	Ravar	Halite, Quartz, Gypsum, Illite, Anhydrite, Chlorohalite, Diopside	768 1336 1417 1795 1926 2214 2332
R1	Ravar	Halite, Quartz, Gypsum, Dolomite, Basanite, Calcite, Chlorohalite, Illite, Alunite	891 1123 1183 1426 1663 1732 1928 2260 2335
R4	Ravar	Calcite, Quartz, Chlorohalite, Albite, Alunite, Muscovite	1033 1165 1324 1410 1755 1915 2212 2344
R6	Ravar	Halite, Quartz, Calcite, Chlorohalite, Muscovite, Albite, Gypsum	1120 1176 1419 1661 1716 1931 2077 2129 2254 2337
R9	Ravar	Gypsum, Basanite, Quartz, Calcite, Boracite	1028 1186 1449 1484 1533 1751 1941 2212
Kh11	Khatonabad	Gypsum, Quartz, Calcite	675 1186 1449 1487 1533 1654 1751 1943 2216 2264
Kh17	Khatonabad	Gypsum, Quartz, Halite, Ulexite, Noyate	993 1105 1243 1447 1489 1537 1746 1945 2173 2212 2267 2430
Kh18	Khatonabad	Gypsum, Quartz, Calcite, Muscovite, Boracite, Clinohalite	1053 1186 1285 1449 1487 1531 1749 1943
Kh2	Khatonabad	Gypsum, Quartz, Calcite, Muscovite, Boracite	481 673 891 1104 1243 1331 1449 1489 1537 1751 1943 2212 2268 2314 2427
Kh6	Khatonabad	Gypsum, Quartz, Calcite, Albite	481 766 894 1090 1449 1487 1533 1751 1943 2110 2214 2316 2430
Kh7	Khatonabad	Halite, Quartz, Calcite, Chlorohalite, Albite, Illite	484 678 900 1040 1162 1331 1415 1642 1925 2216 2286 2335 2349

کانی آریستارنیت نیز کانی بوراته منیزیم سدیم آبدار است که در توالی‌های تبخیری همراه با کانی‌های بردار یافت می‌شود. وجود کانی‌های بردار در این منطقه، حکایت از ارزش اقتصادی این منطقه دارد و کفه خاتون‌آباد یکی از اندیس‌های قابل توجه سازمان زمین‌شناسی کشور معرفی شده است (جودکی و میرزپور، ۱۳۹۵). کانی‌های تبخیری منطقه کوارتز، موسکویت، کلینوکلر، آلپیت و کانی رسی ایلپیت است. در منطقه خاتون‌آباد کانی رسی غالب ایلپیت است. در منطقه راور، کانی‌های غالب تبخیری ژپس و کلسیت است و هالیت از نظر فراوانی در مناطق نمونه‌برداری شده بعد از ژپس و کلسیت قرار دارد. در این منطقه، کانی باسانیت^۱ ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$) و بوراسیت^۲ ($\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$) وجود دارد که در مناطق دیگر دیده نشد. فراوان‌ترین کانی تبخیری منطقه کوارتز است و کانی‌های آلپیت و موسکویت از دیگر کانی‌های تبخیری منطقه است. در این منطقه فراوان‌ترین کانی رسی ایلپیت است. از دیگر کانی‌های رسی می‌توان به دیکیت و آلونیت اشاره کرد.

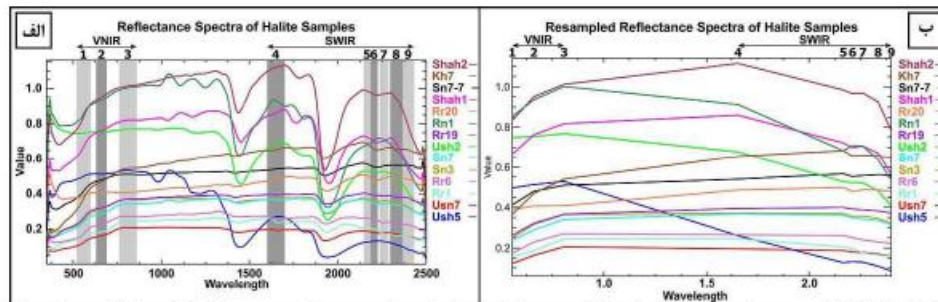
در منطقه راین، از سه کراتر نمونه برداشت شد. کف بزرگ‌ترین کراتر منطقه از نمک پوشیده شده است و نمک مزبور خلوص بالایی دارد. در کراتر بعدی که کوچک‌تر است و به صورت کفه‌ای رسی دیده می‌شود، کانی تبخیری اصلی کلسیت است. علاوه بر آن، کانی‌های تبخیری نظیر کوارتز، کلسیت، کلینوکلر، دیوپسید، ایلپیت، آلونیت و موسکویت نیز یافت می‌شود. تبخیری‌های کراتر واقع در شمال توتک بالا، غالباً از تناردیت تشکیل شده است و همراه آن مقادیر کمتری از کلسیت و ژپس نیز دیده می‌شود. کانی‌های تبخیری همچون کوارتز، موسکویت و آلپیت این کانی‌ها را همراهی می‌کند. نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه شهداد مربوط به رودخانه شور و کفه نمکی حاشیه کویر است. در کفه نمکی، کانی غالب تبخیری هالیت است که مقادیر کمتری از ژپس، کوارتز و کلسیت آن را همراهی می‌کند. در رودخانه شور نیز کانی غالب نمک است، به همراه مقادیر کمتری از کوارتز، ژپس، کلسیت، باسانیت، آلپیت و ارتوز.

در این پژوهش از نمونه‌های زمینی برای به نقشه درآوردن کانی‌های تبخیری استفاده شده است. بدین منظور، از نقاط مختلف نمونه برداشت و طیف سطح این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس، همین طیف، طیف مرجع برای به نقشه درآوردن نقاط مختلف با ویژگی طیفی مشابه استفاده شد. طیف تعدادی از نمونه‌ها در قالب چهار گروه طیفی در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است. این چهار گروه عبارت است از ۱. طیف نمونه‌های هالیت (شکل ۱)، ۲. طیف نمونه‌های ژپس (شکل ۷)، ۳. طیف نمونه‌های تناردیت (شکل ۸)، و ۴. طیف نمونه‌های کلسیت (شکل ۹). در شکل ۶ تا ۹، طیف بازنویسی شده نسبت به باندهای غیرحرارتی سنجنده استر نیز آورده شده است.

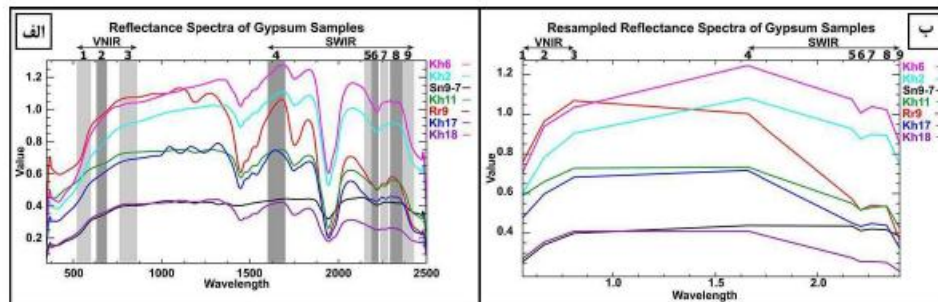
بارزسازی کانی‌های تبخیری

با استفاده از طیف‌های مذکور، روش کمیته‌سازی انرژی مقید برای بارزسازی کانی‌های تبخیری این چهار گروه ارزیابی شد. نتایج حاصل از اعمال این روش در شکل ۱۰ تا ۱۴ آمده است. در پلایای سیرجان، همان‌طور که در شکل ۱۰الف نشان داده شده است، هالیت به‌خوبی بارز شده است. در شرق کفه نواری از ژپس با روند عمومی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی وجود دارد که در قسمت‌های مرکزی این نوار، هالیت تشکیل شده است. در این تصویر هالیت مربوط به این قسمت هم بارز شده است. ژپس نیز مانند هالیت به‌خوبی بارز شده است (شکل ۱۰ب). نتیجه حاصل از اعمال این روش روی طیف تناردیت در شکل ۱۰ج آمده است. در مورد تناردیت، ذکر این نکته ضروری است که به‌سبب شکل ویژه تشکیل آن، در اکثر موارد این کانی در زیرسطح زمین و در عمق ۱۰-۱۵ سانتی‌متری زمین تشکیل می‌شود، چرا که بر اثر خاصیت موئینه و صعود همراه با آب به سمت بالا، در این عمق نهشته می‌شود. در مناطق مطالعاتی، در اکثر موارد این کانی در زیر قشری از رس تشکیل شده است، اما در برخی موارد به سطح نیز رسیده است که مورد اخیر کمتر دیده می‌شود. بنابراین، در مورد این کانی نمی‌توان با قطعیت اظهار نظر کرد که آیا با اعمال روش سنجنش از دور، مناطقی که تناردیت مشخص شده است قطع به یقین تناردیت است، مگر در مواردی که با مشاهدات صحرایی وسیع این مورد تأیید شود؛ با این حال، در مناطق یادشده هر جا که این کانی به نقشه درآمده است، با مشاهدات صحرایی صحت آن تأیید شده است.

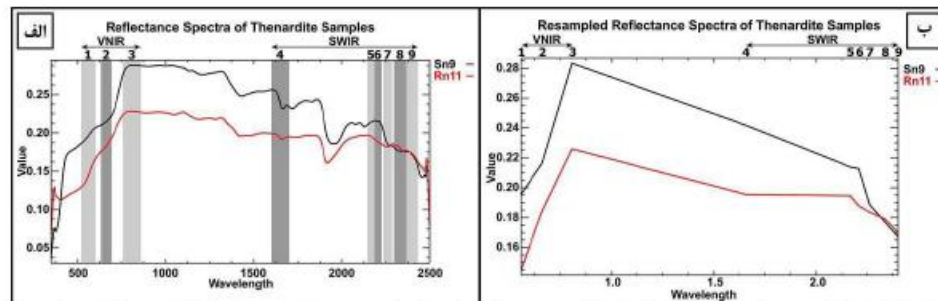
1. Bassanite
2. Boracite



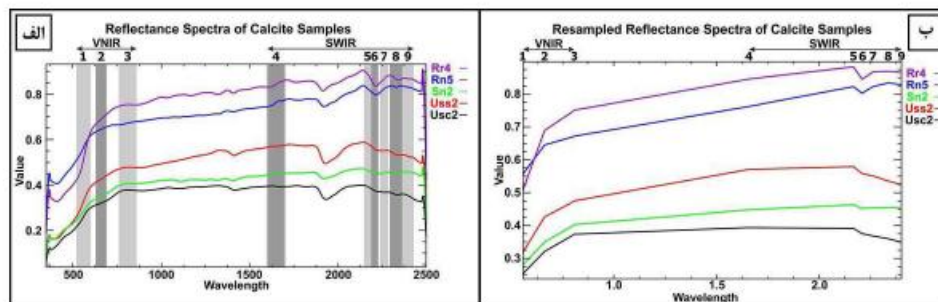
شکل ۱. الف) طیف نمونه‌های هالیت. توارهای خاکستری رنگ، پهنای باندهای سنجنده استر روی طیف الکترومغناطیس را نشان می‌دهد. ب) طیف‌های نمونه‌های هالیت بازنویسی شده بر اساس باندهای سنجنده استر



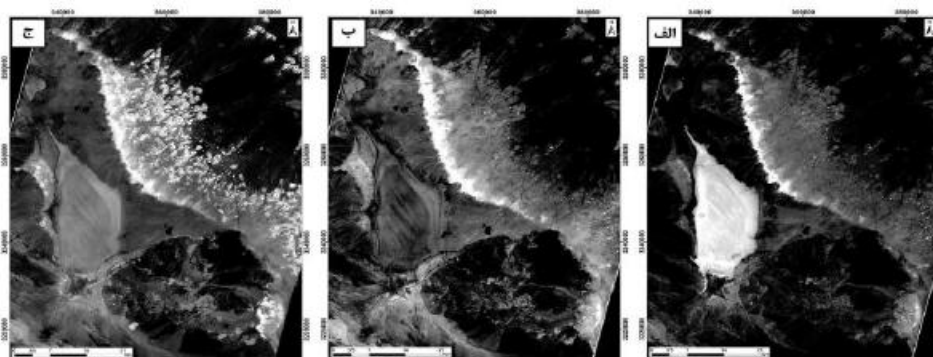
شکل ۲. الف) طیف نمونه‌های گیپس. توارهای خاکستری رنگ، پهنای باندهای سنجنده استر روی طیف الکترومغناطیس را نشان می‌دهد. ب) طیف‌های نمونه‌های گیپس بازنویسی شده بر اساس باندهای سنجنده استر



شکل ۳. الف) طیف نمونه‌های تئاردیت. توارهای خاکستری رنگ پهنای باندهای سنجنده استر روی طیف الکترومغناطیس را نشان می‌دهد. ب) طیف‌های نمونه‌های تئاردیت بازنویسی شده بر اساس باندهای سنجنده استر



شکل ۴. الف) طیف نمونه‌های کلسیت. توارهای خاکستری رنگ پهنای باندهای سنجنده استر روی طیف الکترومغناطیس را نشان می‌دهد. ب) طیف‌های نمونه‌های کلسیت بازنویسی شده بر اساس باندهای سنجنده استر

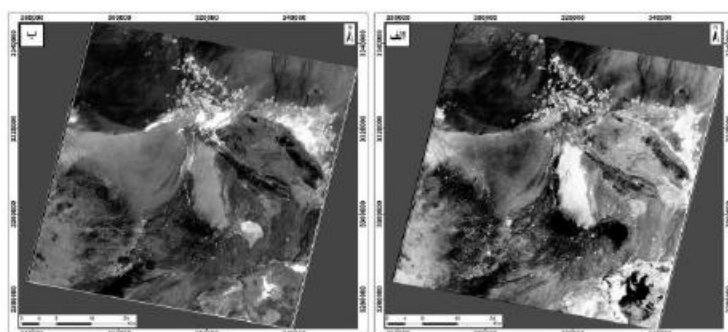


شکل ۵. بارزسازی کانی‌های تبخیری منطقه سیرجان با استفاده از روش CEM. الف) هالیت، ب) ژپس، ج) تناردیت

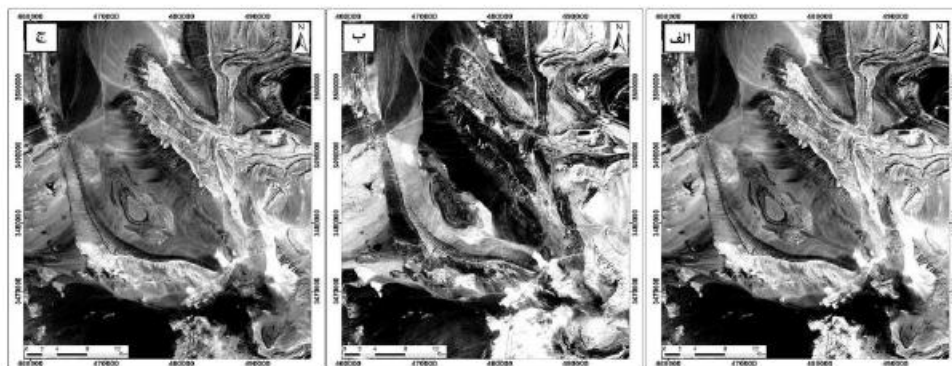
برای مثال، در منطقه سیرجان در جنوب شرقی کفه، در محلی که به نام ترانشه شرقی، ذخیره مناسبی از سولفات سدیم وجود دارد که در سازمان صنعت، معدن و تجارت استان کرمان به ثبت رسیده و بهره‌برداری شده است. در تصویر مربوط به تناردیت سیرجان (شکل ۱۰ ج)، این منطقه نیز بارز شده است که به نظر می‌رسد نتیجه اعمال روش CEM روی تصویر استر این منطقه برای بارزسازی تناردیت نتیجه نسبتاً قانع‌کننده‌ای در پی داشته است.

در مورد کفه خاتون‌آباد، همان‌طور که ذکر شد، اکثر کانی‌های تبخیری منطقه را ژپس و هالیت تشکیل می‌دهد و هالیت در درجه دوم اهمیت واقع شده است. شکل ۱۱ الف و ۱۱ ب به ترتیب نتایج پردازش CEM با طیف مرجع هالیت و ژپس کفه خاتون‌آباد است. مقایسه نتایج با داده‌های زمینی نشان می‌دهد که در این منطقه نیز هالیت و ژپس به خوبی بارز شده است.

در منطقه راور، نقشه‌های مربوط به هالیت، ژپس و کلسیت به ترتیب در شکل ۱۲ الف، ۱۲ ب و ۱۲ ج مشاهده می‌شود. در این منطقه ژپس به خوبی تفکیک شده است، اما در مورد هالیت و کلسیت هم‌پوشانی دیده می‌شود و علت آن هم این است که هر جا که هالیت وجود دارد مقداری کلسیت هم با آن وجود دارد، در حالی که این مسئله در مورد ژپس و هالیت به این شدت نیست و در مناطقی صرفاً ژپس تشکیل شده است که به خوبی بارز شده است. مسئله دیگری که کمی از مشکل تداخل هالیت و کلسیت می‌کاهد این است که هالیت بازتاب طیفی بالاتری نسبت به کلسیت دارد. در منطقه راین، نمونه‌های تبخیری از سه کراتر از کراترهای منطقه برداشت شد. در دهانه بزرگ‌ترین کراتر، هالیت زیادی تجمع یافته است و در اینجا این کراتر، کراتر ۱ نامیده می‌شود. کراتر ۲ کراتر کوچکی در کنار کراتر ۱ است که عمق زیادی ندارد و کف آن به صورت کفه‌ای رسی- نمکی درآمده است. نتایج XRD حاصل از نمونه‌های کراتر ۲ نشان داد که کانی تبخیری غالب بیشتر کلسیت است.



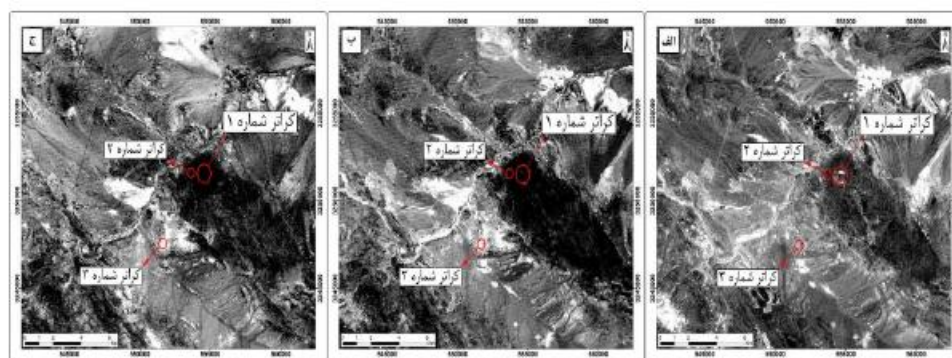
شکل ۶. بارزسازی کانی‌های تبخیری منطقه شهرپایک با استفاده از روش CEM. الف) هالیت، ب) ژپس



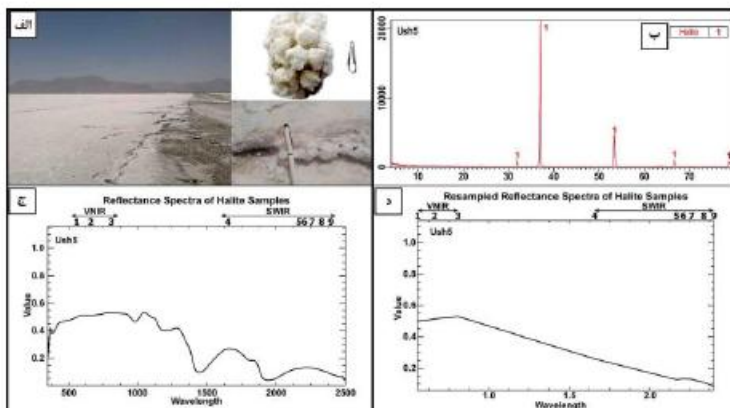
شکل ۷. بارزسازی کانی‌های تپخیری منطقه راور با استفاده از روش CEM. الف) هالیت، ب) ژپس، و ج) کلسیم

کراتر ۳، در شمال روستای توتک بالا واقع شده است. در این کراتر، سولفات سدیم زیادی هم در دیواره‌ها و هم در کف دهانه تجمع یافته است. لازم به ذکر است که سولفات سدیم (تناردیت) موجود در این کراتر به مانند تناردیت سایر مناطق، در زیر قشری از رس تجمع یافته و در برخی نقاط در سطح نمایان شده است. رخنمون تناردیت در این قسمت بسیار بیشتر از مناطق دیگر است. نتایج حاصل از پردازش CEM با استفاده از طیف‌های مرجع هر یک از این دهانه‌ها در شکل ۱۳ آمده است. در منطقه راین، نتایج برای هالیت و سولفات سدیم (شکل ۱۳ الف و ب) بسیار خوب ارزیابی می‌شود. به طوری که در تصویر ۱۳ ب مشاهده می‌شود، سولفات سدیم کراتر ۳ به خوبی بارز شده و حتی رودخانه نزدیک به این کراتر نیز تفکیک شده است و این نشان‌دهنده نقش آب‌های جاری و زیرزمینی در تشکیل حجم زیاد تناردیت است که در مورد راین می‌توان با استفاده از پردازش‌هایی این‌چنینی رودخانه‌های مؤثر در تشکیل ذخیره را ردیابی کرد. در این منطقه نیز کلسیم (شکل ۱۳ ج) به دلیل آمیختگی، نتیجه ضعیف‌تری داشته است.

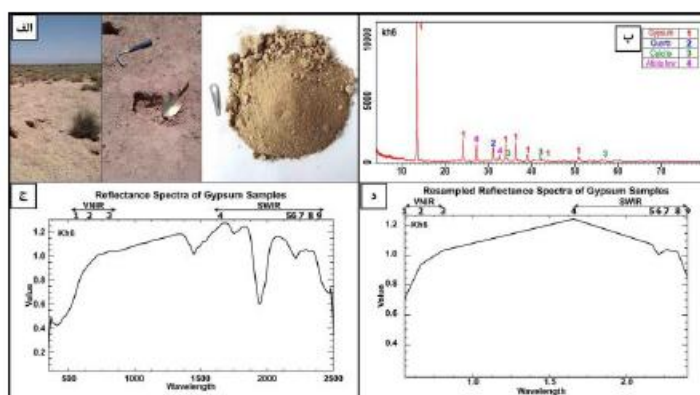
در منطقه شهداد نمونه‌های برداشت‌شده مربوط به رودخانه شور و کفه نمکی حاشیه کویر است. در نمونه‌های مربوط به کفه کسکوییه، کانی‌های تپخیری غالب ژپس، هالیت و سولفات سدیم است. در این مناطق نیز کانی‌های هالیت و ژپس بهتر از سایر کانی‌ها تفکیک شده است. در این پژوهش، به منظور تعیین صحت روش مورد استفاده در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ها با داده‌های زمینی مقایسه شد. شکل ۱۴ تا ۱۷ (مربوط به تعداد کمی از نمونه‌ها)، نمایی از محدوده نمونه برداشت‌شده در منطقه، نمونه دستی مورد استفاده در تهیه طیف مرجع، نتیجه آنالیز XRD منحنی طیفی (طیف مرجع) و منحنی طیفی بازنویسی شده بر اساس تصاویر سنجنده ASTER را نشان می‌دهد.



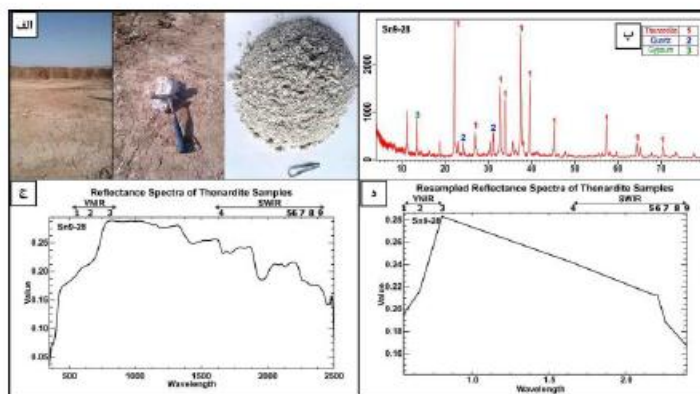
شکل ۸. بارزسازی کانی‌های تپخیری منطقه راین با استفاده از روش CEM. الف) هالیت، ب) تناردیت، و ج) کلسیم



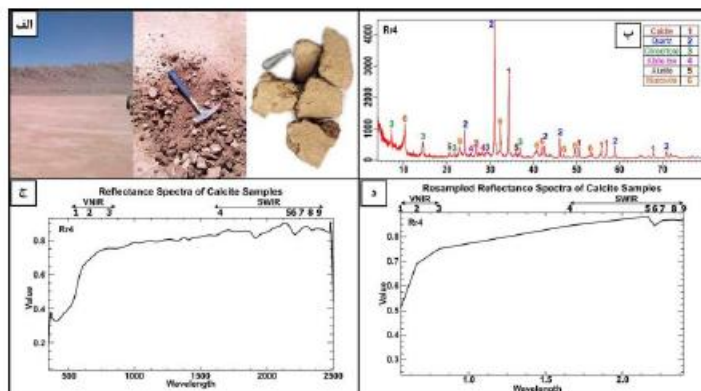
شکل ۹. هالیت خالص مربوط به کفه نمکی سیرجان. الف) تمامی از کفه نمکی سیرجان به همراه نمونه برداشت شده برای طیف‌نگاری. ب) بافت گل‌کلمی نمونه هالیت در عکس مشهود است، ب) نمودار XRD نمونه، ج) منحنی طیف نمونه نمک خالص برداشت شده از کفه نمکی سیرجان، د) منحنی طیفی بازنویسی شده نسبت به پاندهای استر نمونه هالیت کفه نمکی سیرجان



شکل ۱۰. نمونه زبیس مربوط به کفه خاتون‌آباد. الف) تمامی از کفه خاتون‌آباد و نمونه زبیس مورد استفاده در طیف‌نگاری، ب) نمودار XRD نمونه زبیس کفه خاتون‌آباد، ج) منحنی طیفی نمونه زبیس، د) منحنی طیفی بازنویسی شده نسبت به پاندهای استر نمونه زبیس خاتون‌آباد



شکل ۱۱. نمونه تئاردیت مربوط به جنوب شرقی کفه نمکی سیرجان. الف) تمامی از منطقه تئاردیت‌دار و نمونه برداشت شده برای طیف‌نگاری، ب) طیف XRD نمونه شکل الف، ج) منحنی طیفی تئاردیت، د) منحنی طیفی تئاردیت بازنویسی شده نسبت به پاندهای استر



شکل ۱۲. نمونه کلسیت مربوط به منطقه راور. الف) تمامی از کالکریت و نمونه برداشت شده برای طیف‌نگاری، ب) طیف XRD نمونه شکل الف، ج) منحنی طیفی کلسیت، د) منحنی طیفی کلسیت بازنویسی شده نسبت به باندهای استر

بحث

تأثیر سنگ‌های ناحیه بر کانی‌شناسی تبخیری‌ها

در مناطق گوناگون و بر حسب شرایط خاص هر منطقه اعم از شرایط آب‌وهوایی و میزان نزولات جوی، شرایط سنگ‌شناسی، شرایط ساختاری، وضعیت سطح آب زیرزمینی و جز آن انواع کانی‌های تبخیری تشکیل می‌شود. بازتاب طیفی مناطق پوشیده از نمک، به کانی‌شناسی نمک موجود در آن مناطق وابسته است. برای مثال، به پالایای سیرجان می‌توان اشاره کرد. در این منطقه به دلیل وجود لایه‌های نفوذناپذیر در عمق (ناظم‌زاده شعاعی و عزیزان، ۱۳۶۹) تأثیر آب زیرزمینی به حداقل رسیده و آب‌های سطحی که به صورت سیلاب‌های فصلی و رواناب‌های سطحی در فصول مرطوب سال به حوضه وارد می‌شود، در تشکیل کانی‌های تبخیری این پالایا نقش اصلی را ایفا می‌کند. این پالایا را از اطراف ارتفاعاتی احاطه کرده است که از سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل می‌شود. این سنگ‌ها به دلیل داشتن منابع غنی از سولفور، سدیم و کلسیم، مواد لازم برای تشکیل کانی‌های سولفات سدیم و کلسیم را فراهم می‌آورد. کلسیم و سدیم لازم، از تخریب قلدسپارهای موجود در سنگ‌های آذرین تأمین می‌شود. منشأ بخشی از کلر مورد نیاز برای تشکیل هالیت را نیز می‌توان بر اساس مطالعات اطمینان (۱۹۷۷)، به وجود میانبارهای کلرید سدیم موجود در تشکیلات آذرین نسبت داد و بخش مهمی از کلرید سدیم مجتمع در کف و لایه‌های زیرین پالایای سیرجان را حاصل از تبخیر در دوره بین یخچالی آب دریایی دانست که در آب‌وهوای پرباران دوره یخچالی وورم در منطقه وجود داشته است.

در کراترهای منطقه توتک بالای شهرستان راین، کانی‌های تبخیری غالب، تناردیت و ژپس است و تشکیل برجای این کانی‌ها به دلیل شرایط خاص کراترهاست، چرا که آب سطحی در اثر نفوذ، مواد دهانه و غنی از سولفات را می‌شوید و به عمق می‌برد. در نهایت، برای فرایند موبینگی و تبخیر دوباره همین آب که در اثر شستشوی سولفات‌ها غنی شده است به سطح برمی‌گردد و در زیر قشر سطحی خاک رسوب می‌کند.

در کفه خاتون‌آباد، مخلوطی از نمک، ژپس، کلسیت و کانی‌های بردار را می‌توان یافت. تنوع موجود در این منطقه به تنوع سنگ‌شناسی ارتفاعات محدودکننده منطقه برمی‌گردد. رسوبات موجود در این کفه سیلت‌ها و رس‌های ریزدانه است و اغلب از ارتفاعات شمالی (ارتفاعات مساحیم و مدوار) و عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی آذرآواری تشکیل شده است. توپوگرافی این منطقه در نتیجه عملکرد گسل واقع در جنوب کفه و دارای روندی شمال‌غربی - جنوب‌شرقی باعث شده است که ارتفاعات جنوبی منطقه به شکل فرازمین درآید. در نتیجه، رسوبات از کوهستان‌های مرتفع شمالی به سمت جنوب کفه از درشت‌دانه به ریزدانه تبدیل می‌شود. در زیر کفه لایه‌ای آهکی به ضخامت ۱/۵ متر وجود دارد (سبزه‌نی و روشن‌روان، ۱۳۶۴). پس از فصل بارندگی و در اثر تبخیر سطحی محلول‌های زیرسطحی (پدیده موبینگی) نخست ژپس و بعد نمک و در آخر در مجاورت با سطح زمین برآکس به شکل ندول با ابعاد مختلف رسوب می‌کند.

در منطقه راور، نمک و ژپس غالب‌ترین کانی‌ها و یکی از دلایل وفور این کانی‌ها در رسوبات کواترنری، فرسایش، انحلال و تبلور مجدد این کانی‌ها از لایه‌های تبخیری قدیمی به سن ژوراسیک است. این لایه‌ها بر اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید منطقه در سطح رخنمون یافته است که عامل ایجاد گسلش و چین‌خوردگی در منطقه است.

تفسیر داده‌ها

با مطالعه منحنی طیفی نمونه‌های تبخیری شش منطقه تبخیری در استان کرمان، باندهای جذبی هر منحنی طیفی مشخص شد (جدول ۱). بررسی‌های طیفی مربوط به نمونه‌هایی که خالص نیست با پیچیدگی همراه است، اما آنچه در نمونه‌های این پژوهش بارز است حضور جذب‌های قوی مربوط به حضور آب در کانی‌های این نمونه‌ها چه به صورت حضور در ساختمان کانی‌هایی مانند ژپس و باسانیت و چه به صورت جذب سطحی کانی‌هایی مانند هالیت است. از آنجا که کانی‌های تبخیری، به خصوص نمک، تمایل بالایی در جذب آب دارد، این مسئله در طول موج‌های نزدیک به ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر تقریباً در تمامی نمونه‌ها دیده شد. همان‌طور که در مبحث کانی‌شناسی اشاره شد، فراوان‌ترین کانی رسی موجود در مناطق مطالعاتی کانی‌های ایلیت و کانولینیت است. این کانی‌ها جذب‌های مربوط به خود را در طول موج ۲۲۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. در مورد کانی‌های عمده این مناطق، یعنی هالیت، اغلب جذب‌ها در نزدیکی طول موج‌های ۱۴۳۲ و ۱۹۳۶ نانومتر رخ داده است (شکل ۶ و ۱۴).

منحنی‌های طیفی نمونه‌های با کانی غالب هالیت نشان داد که اغلب این نمونه‌ها، در محدوده باند ۶ سنجنده ASTER جذب دارد، اما در مورد نمونه خالص هالیت برای مثال، نمونه ush5 در شکل ۱۴ از مرکز کفه نمکی سیرجان و نمونه Rn1 از کراتر ۱ در منطقه راین، این جذب در محدوده باند ۵ سنجنده استر قرار گرفته است و می‌توان چنین استنباط کرد که با خالص‌تر شدن نمونه تبخیری هالیت، محل جذب روی طیف الکترومغناطیس بازنویسی شده به استر به سمت باند با طول موج کمتر گرایش پیدا می‌کند و به‌طور عکس در نمونه‌های با تنوع کانیایی، محل باند جذبی به سمت طول موج بالاتر نیل می‌کند که در این مورد می‌توان به نمونه‌های Rr1 و Rr6 اشاره کرد که نسبت به سایر نمونه‌های با کانی غالب هالیت، تنوع کانیایی بیشتری دارد. برای مثال، در این نمونه‌ها، کانی دگرسانی آلونیت دیده می‌شود که در سایر نمونه‌های با ترکیب غالب هالیت دیده نمی‌شود و در این نمونه‌ها با وجود آنکه کانی غالب هالیت است، جذب در محدوده باند شش ASTER دیده می‌شود.

طیف کانی ژپس، همان‌طور که در شکل ۷ و ۱۵ مشاهده می‌شود، سیمای طیفی خاص خود را در طول موج‌های ۱۴۴۶، ۱۴۸۸ و ۱۵۴۰، ۱۷۵۲، ۱۹۴۰ و ۲۲۱۴ نانومتر نشان می‌دهد. باند جذبی اصلی و عمیق ۱۴۴۶ نانومتر که مربوط به آب موجود در این کانی است به همراه دو شانه در طول موج‌های ۱۴۸۸ و ۱۵۴۰ نانومتر وجه مشخصه خوبی برای این کانی محسوب می‌شود. جذب موجود در ۲۲۱۴ نانومتر، به دلیل بنیان سولفات موجود در این کانی رخ می‌دهد. طیف‌های بازنویسی شده نمونه‌های با کانی غالب ژپس، نشانگر آن است که این نمونه‌ها در طیف‌های بازنویسی شده به استر، همگی در محدوده باند ۶ این سنجنده جذب دارد.

منحنی‌های طیفی کانی‌های تناردیت (شکل ۸ و ۱۶) نشان می‌دهد که این کانی در طول موج‌های ۱۴۲۰، ۱۶۶۱، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر طیف الکترومغناطیس، جذب نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در مورد منحنی‌های طیفی این کانی این است که سیمای جذبی این کانی در محدوده جذب آب پهنای بیشتری نسبت به هالیت و ژپس دارد. منحنی‌های طیفی نمونه‌های کلسیت (شکل ۹ و ۱۷) در طول موج‌های ۱۴۱۳، ۱۹۱۵، ۲۲۰۸ و ۲۳۳۷ نانومتر جذب نشان می‌دهد. باندهای جذبی ۱۴۱۳ و ۱۹۱۵ نانومتر مربوط به آب جذبی و بقیه در ارتباط با ارتعاشات بنیان کربنات موجود در این کانی است. از نظر میزان بازتاب این چهار گروه کانی، کانی‌های هالیت و ژپس در محدوده VNIR میزان بازتاب تقریباً مشابهی دارد، اما کانی‌های کلسیت و تناردیت، میزان بازتاب متفاوتی دارد. میزان بازتاب کلسیت از ژپس و هالیت کمتر است و تناردیت کمترین میزان بازتاب را به خود اختصاص داده است.

با استفاده از طیف‌های موجود در شکل ۶ تا ۹ و با استفاده از روش CEM، کانی‌های تبخیری مناطق مطالعاتی در

استان کرمان بارزسازی شد. در منطقه سیرجان (شکل ۱۰ الف، ب و ج)، نتیجه اعمال این روش برای کانی‌های هالیت و ژپس خوب و برای کانی تناردیت نسبتاً خوب ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است که ارزیابی صحت کانی‌های بارز شده با استفاده از داده‌های زمینی انجام گرفته است و شکل ۱۴ تا ۱۷ جهت اختصار، بخشی از منطقه نمونه برداری را به تصویر می‌کشد. نتیجه بارزسازی کانی‌های هالیت و ژپس در منطقه خاتون‌آباد با استفاده از روش CEM در شکل ۱۱ الف و ب مشاهده می‌شود و هر دو کانی به خوبی تفکیک شده است.

در منطقه راور، نقشه‌های مربوط به هالیت، ژپس و کلسیت به ترتیب در شکل ۱۲ الف، ب و ج مشاهده می‌شود. در این منطقه ژپس به خوبی تفکیک شده است، اما در مورد هالیت و کلسیت همپوشانی دیده می‌شود و علت آن هم اختلاط این دو کانی است؛ در حالی که این مسئله در مورد ژپس و هالیت به این شدت نیست و در مناطقی صرفاً ژپس تشکیل شده است که به خوبی بارز شده است. مسئله دیگری که کمی از مشکل تداخل هالیت و کلسیت می‌کاهد، تفاوت بازتاب طیفی این دو کانی است، چرا که بر اساس طیف‌های شکل ۶ (هالیت) و شکل ۹ (کلسیت)، کانی هالیت بازتاب طیفی بالاتری دارد، لذا در تصاویر خروجی با درخشندگی بیشتری از کلسیت تمایز پذیر است. نتایج بارزسازی کانی‌های تبخیری موجود در سه کراتر از کراترهای منطقه را این برای هالیت و سولفات سدیم (شکل ۱۳ الف و ب) بسیار خوب ارزیابی می‌شود. در این منطقه نیز کلسیم (شکل ۱۳ ج) به دلیل آمیختگی، نتیجه ضعیف‌تری داشته است. در منطقه شهداد و کشکویه نیز نتیجه روش خوب ارزیابی می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱. طبق نتایج حاصل از روش XRD مربوط به مناطق تبخیری مورد مطالعه در استان کرمان و کانی‌های تبخیری عمده هر کدام از مناطق مشخص شد که در منطقه سیرجان، کانی غالب تبخیری و هالیت است و کانی‌های ژپس، کلسیت و تناردیت در رده‌های بعدی قرار می‌گیرد. در منطقه خاتون‌آباد، هالیت کانی اصلی نیست و ژپس و کلسیت بیشترین فراوانی را به خود اختصاص می‌دهد. علاوه بر آن، در منطقه خاتون‌آباد کانی‌های بُردار نادری همچون اینیونیت، برکرایت و آریستارنیت به همراه کانی یولکسیت مشاهده شد. در منطقه راور، کانی‌های غالب تبخیری ژپس و کلسیت است و هالیت از نظر فراوانی در مناطق نمونه‌برداری شده بعد از این دو کانی قرار دارد. در این منطقه، کانی باسانیت و بوراسیت وجود دارد که در مناطق دیگر دیده نشد.
۲. سیمای طیفی نمونه‌های تبخیری مناطق مطالعاتی ارائه شده است.
۳. در تمامی کانی‌های تبخیری مطالعه شده، جذب در محدوده نزدیک به ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر دیده می‌شود. جذب در این طول موج‌ها، مربوط به حضور آب است. در نمونه‌های بررسی شده مناطق مطالعاتی، حتی در کانی‌هایی که در ترکیب ساختاری خود آب هم ندارد نیز این دو جذب مشاهده می‌شود. جذب آب در این دو محدوده به دلیل ارتباط و وابستگی کانی‌های تبخیری به آب است. در مورد کانی‌هایی که در ساختار خود آب ندارد، این آب به صورت جذب سطحی توسط این کانی‌ها، جذب می‌شود.
۴. کانی‌های تبخیری غالباً در محدوده باند ۶ تصویر ASTER جذب نشان می‌دهد. اما، مطالعه حاضر نشان می‌دهد که این مسئله در مورد هالیت متفاوت است، چرا که هر چه ترکیب نمونه هالیت از خلوص بیشتری برخوردار باشد، این جذب در محدوده باند پنج ASTER خود را نشان می‌دهد. به عبارتی، با خالص‌تر شدن ترکیب نمونه، باند جذبی روی طیف بازنویسی شده بر اساس ASTER به سمت طول موج پایین‌تر نیل می‌کند.
۵. در بررسی سیمای طیفی نمونه‌های با کانی غالب تناردیت، مشخص شد که این نمونه‌ها، در محدوده طیفی جذب آب، پهنای جذب بیشتری نسبت به هالیت و ژپس نشان می‌دهد.
۶. کانی‌های تبخیری میزان بازتاب بالایی دارد. در بررسی میزان بازتاب چهار کانی عمده تبخیری مناطق مطالعاتی، مشخص شد که هالیت و ژپس بیشترین میزان بازتاب طیفی و تناردیت کمترین میزان بازتاب را دارد.
۷. با توجه به نتایج حاصل از اعمال روش CEM روی تصاویر ASTER مناطق تبخیری استان کرمان، مشخص شد که این روش، روش مناسبی برای تفکیک کانی‌های تبخیری است.

سپاسگزاری

از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به دلیل انجام آنالیزهای XRD قدردانی می‌نماییم. از کارکنان آزمایشگاه طیف‌سنجی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته برای مساعدت در زمینه برداشت طیفی سپاسگزاریم.

منابع

- اشراقی، ص.ع. و روشن‌روان، ج. (۱۳۷۳). نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم زرد. ثبت شماره ۷۰۴۹. سازمان زمین‌شناسی ایران. انتشارات گیتاشناسی، نقشه راه‌های ایران، ۱۳۸۷.
- آق‌آبانی، س.ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- چودکی، م. و میرزاپور، ب. (۱۳۹۵). مناطق مستعد ذخایر معدنی تبخیری کشور. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸ ص.
- حاج‌ملاعلی، ع. (۱۳۷۴). نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم راور. ثبت شماره ۷۳۵۲. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- رنجبر، ن. (۱۳۸۷). مقایسه داده‌های ماهواره‌های ASTER و ETM جهت شناسایی کانی‌های تبخیری مطالعه موردی: منطقه کویر سیرجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهبهانی کرمان، ۱۲۴ ص.
- روشن‌روان، ج.، اشراقی، ص.ع. و سبزه‌ئی، م. (۱۳۷۵). نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم سیرجان. ثبت شماره ۷۱۴۸. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- سبزه‌ئی، م. و روشن‌روان، ج. (۱۳۶۴). گزارش اکتشاف تفصیلی براکس خاتون‌آباد. مدیریت زمین‌شناسی منطقه جنوب خاوری مرکز کرمان، ۳۳ ص.
- سبزه‌ئی، م.، اشراقی، ص.ع.، روشن‌روان، ج. و سراج، م. (۱۳۷۶). نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم گل‌گهر. ثبت شماره ۷۰۴۸. سازمان زمین‌شناسی ایران.
- سهن‌دی، م. ر. (۱۳۷۴). نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم خرچند. ثبت شماره ۷۴۵۱. سازمان زمین‌شناسی ایران.
- قهرودی‌تالی، م. (۱۳۹۰). کاربرد تکنیک PCA و شاخص OIF در شناسایی کانی‌های تبخیری در پلایاها. مطالعه موردی: دریاچه مهارلو. دومین همایش علوم زمین: ۱-۱۴.
- میرزاخانی، ب. و عسگری، آ. (۱۳۹۱). کاربرد تکنیک PCA در شناسایی سطوح تبخیری دریاچه حوض سلطان. سومین همایش ملی مقابله با بیابان‌زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران، اراک: ۵۲۶-۵۳۲.
- ناظم‌زاده شعاعی، م. و عزیزان، ج. (۱۳۶۹). گزارش اکتشاف مقدماتی پتاس در پلایای سیرجان. مدیریت زمین‌شناسی منطقه جنوب خاوری، ۲۹ ص.
- ناظم‌زاده شعاعی، م. و عزیزان، ج. (۱۳۵۲). نقشه زمین‌شناسی کسکوئیه. ثبت شماره ۷۱۵۱. سازمان زمین‌شناسی ایران.
- هائمی تنگستانی، م. و دهقان طرره، ف. (۱۳۷۴). تحلیل مشخصات طیفی کانی‌های تبخیری دریاچه مهارلو. شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- Aghanabati, A. (2004). Geology of Iran. Geological Survey of Iran, 586 pp. [in Persian]
- Alavipanah, S.K. and Pouyafar, A.M. (2005). Potentials and constraints of soil salinity studies in two different conditions of Iran using Landsat TM data. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, Saint Petersburg, Russia: Russian Federation.
- Alavipanah, S.K., Matinfar, H.R., Samnasti, N., Jafarbeglou, M. and Goodarzimehr, S. (2011). Evaluation of ASTER and LISS III data in identification of saline soils, Case study: regions of Iran. GeoComputation, 20-22 July 2011 London, UK. University College London: 134-146.
- Alavipanah, S.K., Pouyafar, A.M. and Tahmasebi, A. (2004). The application of field soil salinity map in classifying Landsat imagery. The 23rd Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, 2-5 June 2003 Ghent, Belgium: 365-369.
- Alavipanah, S.K. (2000). The use of remote sensing and GIS to detect salt crust in the Iranian deserts. XIXth ISPRS Congress, 16-23 July 2000 Amsterdam, The Netherlands. International Society for photogrammetry and Remote sensing: 39-45.
- Bryant, R.G. (1996). Validated linear mixture modelling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. International Journal of Remote Sensing, 17: 315-330.
- Chang, C.I. and Heinz, D.C. (2000). Constrained subpixel target detection for remotely sensed imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38: 1144-1159.
- Crowley, J.K. (1993). Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from Death Valley, California. Remote Sensing of Environment, 44: 337-356.
- Crowley, J.K. (1991). Visible and near-infrared (0.4-2.5 μm) reflectance spectra of Playa evaporite minerals. Journal of Geophysical Research, 96: 16231-16240.
- Csillag, F., Pásztor, L. and Biehl, L.L. (1993). Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils. Remote Sensing of Environment, 43: 231-242.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N., Djordjevic, M. and Vulovic, D. (1971). Geological map of Pariz. Sheet No. 7149, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran.
- Djokovic, I. and Halaviati, J. (1972). Geological map of Khaneh Khatun. Sheet No. 7548, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran.

- Drake, N.A. (1995). Reflectance spectra of evaporite minerals (400-2500 nm): applications for remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 2555-2571.
- Eshraghi, S.A. and Roshan Ravan, J. (1994). Geological map of Zardou. Sheet No. 7049, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Etmann, H. (1977). Le porphyre cuprifère de Sar Cheshmeh (Iran): rôle des phases fluides dans les mécanismes d'altération et de minéralisation. *Fondation scientifique de la géologie et de ses applications*.
- Farrand, W.H. and Harsanyi, J.C. (1997). Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, through the use of a constrained energy minimization technique. *Remote Sensing of Environment*, 59: 64-76.
- Gaffey, S.J. (1986). Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 μm): calcite, aragonite, and dolomite. *American Mineralogist*, 71: 151-162.
- Ghahroudi Tali, M. (2011). Application of PCA technique and OIF index in detection of evaporation Minerals on Playa, Case study: Maharlou Lake. *Second Symposium of the Earth Sciences*. [in Persian]
- Goossens, R. and Van Ranst, E. (1998). The use of remote sensing to map gypseriferous soils in the Ismailia Province Egypt. *Geoderma*: 47-56.
- Hajmolla Ali, A. (1995). Geological Map of Ravar. Sheet No. 7352, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Hashemi Tangestani, M. and Dehghani Tazreh, F. (1995). Analysis of spectral characteristics of evaporite minerals of Maharlou Lake. *Sixteenth Conference of the Geological Society of Iran*. [in Persian]
- Howari, F.M., Goodell, P.C. and Miyamoto, S. (2002). Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. *Journal of Environmental Quality*, 31: 1453-1461.
- Hunt, G.R. and Salisbury, J.W. (1971). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates. *Modern Geology*, 2: 23-30.
- Hunt, G.R. and Salisbury, J.W. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals. *Modern Geology*, 1: 283-300.
- Jodaki, M. and Mirzapour, B. (2017). Prone areas of evaporite resources in Iran. *Geological Survey of Iran*, 138 pp. [in Persian]
- Khalili, M. and Safaei, H. (2002). Identification of clastic-evaporite units in Abar-Kuh playa (central Iran) by processing of satellite digital data. *Carbonates and Evaporites*, 17: 17-24.
- Martinez-Montoya, J.F., Herrero, J. and Casterad, M.A. (2010). Mapping categories of gypseous lands in Mexico and Spain using Landsat imagery. *Journal of Arid Environments*, 74: 978-986.
- Mirzakhani, B. and Asgari, A. (2012). Application of PCA technique on determining of evaporite surfaces in Howz-e-Soltan lake. *Third Symposium of the Earth Sciences*. [in Persian]
- Mougenot, B., Pouget, M. and Epema, G.F. (1993). Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7: 241-259.
- Nazemzadeh Shoaie M. and Azizan H. (1990). Preliminary exploration of potash in Sirjan Playa. *Geological survey of Iran*, 29 pp. [in Persian]
- Nazemzadeh Shoaie, M. and Azizan, H. (1973). Geological map of Koshkuieh. Sheet No. 7151, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Oztan, N.S. and Suzen, M.L. (2011). Mapping evaporate minerals by ASTER. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 1651-1673.
- Oztan, N.S. (2008). Evaporate mapping in Bala region (Ankara) by remote sensing techniques. *Master of Science MSc Thesis*, Middle East Technical University, 97 pp.
- Ozyavas, A. (2016). Assessment of image processing techniques and ASTER SWIR data for the delineation of evaporates and carbonate outcrops along the Salt Lake Fault, Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 37: 770-781.
- Ranjbar N. (2009). An investigation of ASTER and ETM data for exploring evaporate minerals in Sirjan playa. *Master of Science Thesis of Economic Geology*, Shahid Bahonar University of Kerman, 124 pp. [in Persian]
- Rezaei Moghaddam, M.H. and Saghafi, M. (2006). A change-detection application on the evolution of Kahak playa (South Khorasan province, Iran). *Environmental Geology*, 51: 565-579.
- Roshan Ravan, J., Eshraghi, S.A. and Sabzehei, M. (1996). Geological map of Sirjan. Sheet No. 7148, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Sabzehei, M., Eshraghi, S.A., Roshan Ravan, J. and Seraj, M. (1997). Geological map of Gole-Gohar. Sheet No. 7048, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Sabzehei, M. and Roshan Ravan, J. (1985). Detailed exploration report of Borax in Khatoonabad. *Geological Survey of Iran*, 33 pp. [in Persian]
- Sahandi, M.R. (1995). Geological map of Horjand. Sheet No. 7451, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Sanic, A., Djordjevic, M., and Dimitrijevic, M.N. (1971). Geological map of Shahr-e-Babak. Sheet No. 7050, 1:100,000 series, Geological Survey of Iran.
- Soltaninejad, A., Ranjbar, H., Honarmand, M. and Dargahi, S. (2017). Evaporite mineral mapping and determining their source rocks using remote sensing data in Sirjan playa, Kerman, Iran. *Carbonates and Evaporites*: 1-20.
- Stöcklin, J., Eftekhari-Nezhad, J. and Hushmand-Zadeh, A. (1972). Central Lut reconnaissance, East Iran. *Geological Survey of Iran*.
- Taghizadeh Mehrjardi, R., Mahmoodi, S., Taze, M. and Sahebjalal, E. (2008). Accuracy assessment of soil salinity map in Yazd-Ardakan plain, Central Iran, based on landsat ETM+ imagery. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 3: 708-712.
- Zehetabian, G.R., Alavipanah, S.K. and Ehsani, A.H. (2002). The use of Landsat Thematic Mapper data for mapping the marginal playa soils in Damghan playa, Iran. *Spatial Information in Mapping and Cadastral Systems*, Washington, D.C. USA.