

سنجش از دور کانی‌های مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در ژئوتوریسم و اکتشاف منابع؛ مطالعه موردی تفتان، جنوب‌شرق ایران

عالیه سیفی*^۱، مهدیه حسینجانی زاده^۱، زهرا مختاری^۲

^۱گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

a.seifi@student.kgut.ac.ir, m.hosseinjanizadeh@kgut.ac.ir

^۲گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

چکیده

کوه تفتان با دارا بودن آثار متعددی از قبیل دودخان، چشمه آب‌گرم، سنگ‌های آتشفشانی و مناطق دگرسانی دارای ارزش ژئوتوریسم و اکتشافی می‌باشد. این مطالعه با هدف شناسایی کانی‌های مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در کوه تفتان واقع در جنوب‌شرق ایران با کمک تصاویر استر و لندست ۷ انجام گرفته است. تلفیقی از مجموعه باندهای مرئی-فروسرخ نزدیک لندست ۷ و فرسرخ موج کوتاه استر (بنام تصویر تلفیقی) برای مطالعات کانی‌شناسی مناطق دگرسانی و چشمه‌های آب‌گرم مورد استفاده قرار گرفت. برای نقشه‌برداری کانی‌های مناطق دگرسانی و نهشته‌های چشمه‌های آب‌گرم از روش هیبرید، مرکب از نسبت باندی و آنالیز مولفه اصلی استفاده گردید. کانیهای دگرسانی بارز شده در کوه تفتان توسط دگرسانی آرژیلیک در مطالعات میدانی تایید شدند. موقعیت تعدادی از چشمه‌های آب‌گرم دامنه کوه تفتان با کانی‌های بارز شده حاوی Ca، Fe و K مانند کلسیت، ژیپس و ژاروسیت هماهنگی داشت. با توجه به نتایج مطالعات دورسنجی و میدانی می‌توان نتیجه گرفت که آثار و دگرسانی‌های ناشی از وجود انرژی زمین‌گرمایی در کوه تفتان، این منطقه را از نظر ژئوتوریسم و اکتشافی غنی کرده است.

کلیدواژه‌ها

استر؛ لندست ۷؛ زمین‌گرمایی؛ ژئوتوریسم؛ سیستان و بلوچستان

مقدمه

سیستم‌های زمین‌گرمایی در مناطق مختلف کره زمین دیده می‌شوند. برخی از کشورها مانند ایران بر روی کمرندهای اصلی منابع زمین‌گرمایی جهان قرار دارند (بومری، ۱۳۸۴). از مناطق زمین‌گرمایی ایران کوه‌های آتشفشانی جوان از جمله دماوند، سهند، سبلان، بزمان و تفتان را می‌توان نام برد. آتشفشان تفتان دارای قله متعددی می‌باشد که اصلی‌ترین آنها دارای دو قله یکی در شمال غرب (به نام نرکوه) و دیگری در جنوب شرق (مادر کوه یا تفتان) است که بام استان سیستان و بلوچستان با ارتفاع تقریبی ۴۰۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. نشانه‌های مناطق زمین‌گرمایی مثل وجود چشمه‌های آب‌گرم و خروج بخارات و گازهای گوگردی در دامنه‌های کوه آتشفشانی تفتان وجود دارد (بومری، ۱۳۸۴). در رسوبات اطراف دهانه چشمه‌های آب‌گرم تفتان

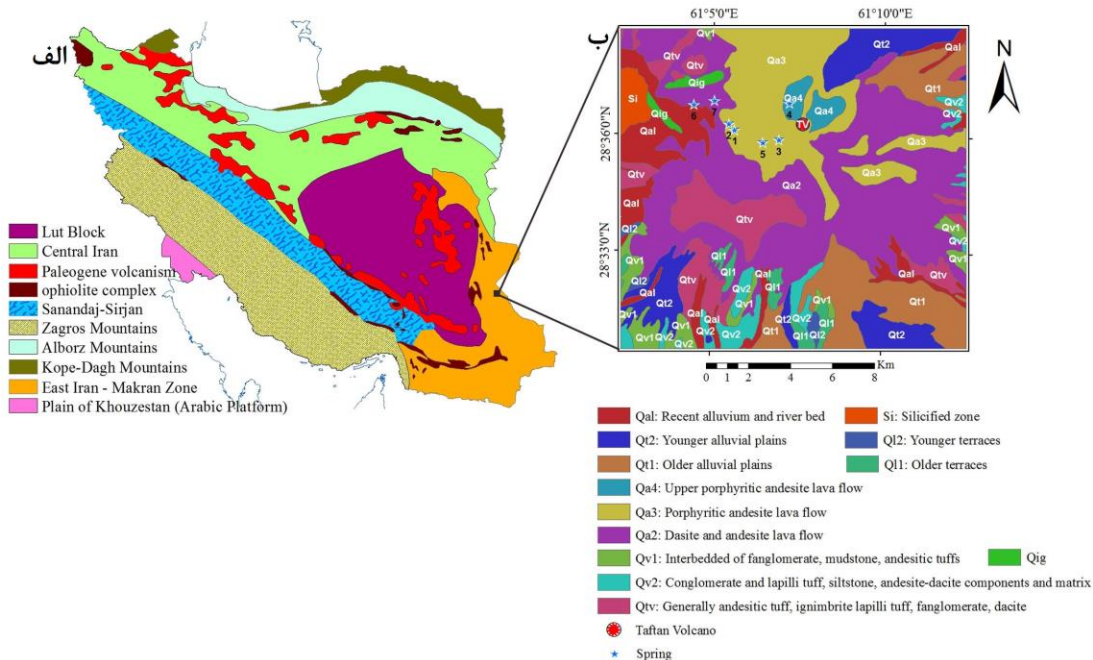
کانی‌های انیدریت، ژپس، کالسدونی و ژاروسیت گزارش شده است (مر و همکاران، ۱۳۸۴). همچنین دگرسانی‌های آرزیلیتی و کائولینیتی که مرتبط با فعالیت محلول‌های گرمایی هستند، در این منطقه مشاهده شده است (مر و همکاران، ۱۳۸۴؛ مهرپرتو و پادیار، ۱۳۸۲). طبیعت زیبا و چشم‌اندازهای دلنواز تفتان، وجود چشمه‌های آب‌گرم و خروج بخارات و گازهای گوگردی، قرارگیری بلندترین قله استان سیستان و بلوچستان در این منطقه و انجام فعالیت‌های کوهنوردی در این منطقه پتانسیل زیادی برای انجام فعالیت‌های ژئوتوریسمی ایجاد کرده است.

با توجه به پرهزینه بودن بررسی‌های میدانی مناطق زمین‌گرمایی، چنانچه امکان انجام اینگونه عملیات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای وجود داشته باشد گامی مؤثر در نقشه‌برداری منابع جدید و پایش مناطق موجود خواهد بود. سنجنده تابش‌سنج بازتابی و گسیلش گرمایی فضا برد پیشرفته (ASTER) و ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM+ به دلیل دارا بودن باندهای طیفی در محدوده‌های مرئی-فروسرخ نزدیک، فروسرخ موج کوتاه و فروسرخ حرارتی برای نقشه‌برداری آثار مربوط به سیستم‌های زمین گرمایی مانند چشمه‌های آب‌گرم، دودخان‌ها و گسل‌ها مفید می‌باشند. کوه‌های دماوند، سیلان و بزمان که جزو مناطق زمین گرمایی ایران محسوب می‌شوند، با کمک ابزار دورسنجی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در طی این تحقیقات پویایی آتشفشان دماوند، سازوکار هندسی گسل‌های منطقه ژئوترمال شمال غرب سیلان و شناسایی پتانسیل‌های زمین گرمایی آتشفشان بزمان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر، لندست ۷، باند پانکروماتیک IRS، مدل ارتفاع رقومی و همچنین فناوری GIS بررسی شده‌اند (مؤذن زاده و همکاران، ۱۳۸۷؛ حقیقی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Eskandari et al., 2015).

کوه تفتان یکی دیگر از سیستم‌های زمین گرمایی ایران است که در دامنه‌های آن شواهد خروج دودخان و وجود چشمه‌های آب گرم گزارش شده است. مطالعات هیدروژئوشیمی، دماسنجی و ایزوتوپی آب چشمه‌های دامنه کوه تفتان به منظور تعیین مشخصات شیمیایی گازهای خروجی و چشمه‌های آب‌گرم در آتشفشان تفتان انجام گرفته است (بومری، ۱۳۸۴؛ مر و همکاران، ۱۳۸۴؛ مختاری و احمدی، ۱۳۹۱). با وجود مطالعات شیمیایی متعدد در کوه تفتان، تاکنون در این منطقه عملیات سنجش از دور جهت شناسایی آثار مرتبط با زمین گرمایی با اهمیت اکتشافی و ژئوتوریسم منطقه صورت نگرفته است. لذا هدف این مطالعه شناسایی آثار دگرسانی‌های مرتبط با منابع زمین گرمایی در منطقه تفتان که از نظر اکتشافی و ژئوتوریسم در منطقه مهم هستند، با کمک تصاویر دورسنجی شامل استر و لندست ۷ می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مقاله تلفیقی از باندهای استر و لندست ۷ استفاده شده است.

منطقه مورد مطالعه

کوه آتشفشانی تفتان در ۴۵ کیلومتری شمال-شمال غرب شهر خاش در زون ساختاری نهبندان-خاش در جنوب شرق ایران واقع شده است (شکل ۱ الف). این کوه درون سنگ‌های رسوبی و آذرین متعلق به کرتاسه و ائوسن زون شرق ایران فوران کرده که یکی از آتشفشان‌های جوان ایران و متعلق به کواترنری است. سنگ‌های آتشفشانی تفتان شامل گدازه‌ها و توف‌های شدید دگرسان شده، سنگ‌های پیروکلاستیک و لاهار مانند است و تنوعی از گدازه‌های آندزیتی، داسیتی و ریولیتی و حتی بازالتی در تناوب با آنها دیده می‌شود (شکل ۱ ب). در نیمه غربی کوه تفتان ویسکوزیته نسبتاً زیاد گدازه‌ها (آندزیت و داسیت) سبب ایجاد پرتگاه‌های مرتفع شده است (بومری، ۱۳۸۴). فعالیت محلول‌های گرمایی در کوه تفتان سبب دگرسانی و آلتراسیون در سنگ‌های آتشفشانی شده است. فعالیت این محلول‌ها با آرزیلیتی و کائولینیتی شدن بخشی در واحد گدازه‌ای، بصورت گسترده قابل رؤیت است. از دیگر پدیده‌های موجود در کوه تفتان وجود چشمه‌های آب‌گرم و آب ترش (جنوب و جنوب غرب تفتان) است (مهرپرتو و پادیار، ۱۳۸۲).



شکل ۱: الف: نقشه زمین‌شناسی ایران و موقعیت منطقه مورد مطالعه (معین وزیری، ۱۳۸۳ با تغییرات)، ب: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (مهرپر تو و پادیار، ۱۳۸۲ با تغییرات) ۱: چشمه آب‌گرم سنگان، ۲: چشمه آب‌گرم تفتان، ۳: چشمه آب‌گرم نزدیک پناهگاه، ۴: چشمه آب‌گرم نزدیک پناهگاه، ۵: چشمه تفتان، ۶: چشمه آب سرد اسیدی پایک (موقعیت چشمه‌ها از: بومری، ۱۳۸۴ و شاکری و همکاران، ۱۳۹۴).

نتایج شیمیایی آب چشمه‌های آب‌گرم تفتان و رسوب این چشمه‌ها حاکی از فوق اشباع بودن آب چشمه‌ها نسبت به انیدریت، ژپس، کالسدونی و ژاروسیت است که این رسوبات در اطراف دهانه چشمه‌های با منشأ آب‌های آتشفشانی دیده می‌شود. بر اساس مطالعات مر و همکاران (۱۳۸۴) شواهد وجود آلونیت و انیدریت در منطقه و بالا بودن میزان کلر تا حدودی می‌تواند تاییدکننده چرخش عمیق این آب‌ها باشد.

روش تحقیق

از آنجا که هدف استفاده از تصویر ترکیبی بود سعی شد تصاویر در یک بازه زمانی نزدیک به هم اخذ شوند. تصاویر استر و لندست ۷ که به ترتیب در ۱۰ و ۱۷ ژوئای ۲۰۰۰ تهیه شده‌اند، برای شناسایی کانی‌های مرتبط با منابع زمین گرمایی شامل مناطق دگرسانی و چشمه‌های آب‌گرم موجود در منطقه تفتان استفاده شده است. محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک تصویر لندست ۷ (۴ باند از محدوده آبی تا فروسرخ نزدیک) که دارای باندهای بیشتری نسبت به محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک استر (۳ باند از محدوده سبز تا فروسرخ نزدیک) است؛ برای کانی‌های حاوی بنیان‌های آهن مانند ژاروسیت مناسب می‌باشد. بعلاوه تعداد باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه تصویر استر از تصویر لندست ۷ بیشتر می‌باشد که کاربر را قادر به شناسایی مواد حاوی بنیان‌های هیدروکسیل، سولفات و کربنات (مانند کانیهای رسی) می‌سازد. در این تحقیق به منظور افزایش قابلیت بارسازی از مجموعه باندهای محدوده مرئی-

فروسرخ نزدیک تصویر لندست ۷ و باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه تصویر استر برای شناسایی کانی‌های مرتبط با مناطق زمین گرمایی مانند ژاروسیت، ژپس، کلسیت و کانی‌های رسی استفاده گردید (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات باندهای مورد استفاده از سنجنده‌های ETM⁺ و استر (Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015; National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2009)

محدوده طیفی	شماره باند	مرکز باند (μm)	قدرت تفکیک (m)	سنجنده
مرئی-فروسرخ نزدیک (VNIR)	1 (B1-Landsat 7)	0.485	30	ETM ⁺
	2 (B2-Landsat 7)	0.56	30	
	3 (B3-Landsat 7)	0.66	30	
	4 (B4-Landsat 7)	0.83	30	
فروسرخ کوتاه موج (SWIR)	5 (B4-ASTER)	1.65	30	ASTER
	6 (B5- ASTER)	2.165	30	
	7 (B6- ASTER)	2.205	30	
	8 (B7- ASTER)	2.26	30	
	9 (B8- ASTER)	2.33	30	
	10 (B9- ASTER)	2.395	30	

ابتدا برای از بین بردن اثرات جوی تصاویر استر و لندست ۷، تصحیح جوی خط دید سریع مکعب‌های ابرطیفی (FLAASH) روی باندهای محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک تصویر لندست ۷ و باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه تصویر استر بطور جداگانه انجام گرفت. این تصحیح تاثیرات جوی روی پیکسل‌های تصویر را حذف و تصاویر رادیانس را به تصاویر طیف بازتابی از سطح زمین تبدیل می‌کند (ITT Visual Information Solutions, 2008). سپس، باندهای مذکور با هم تلفیق شدند.

با استفاده از مطالعات علمی انجام گرفته (مر و همکاران، ۱۳۸۴؛ Kratt et al, 2010) کانی‌های مرتبط با دگرسانی حاصل از انرژی زمین گرمایی و چشمه‌های آب‌گرم منطقه تفتان مشخص و سیمای جذبی آنها بر طبق باندهای تلفیق یافته تعیین شدند. سپس از روش نسبت بانندی که یکی از روش‌های مناسب در شناسایی کانی‌ها است، برای بارزسازی استفاده شد. در مرحله بعد، به منظور بارزسازی و آشکارسازی کانی‌های رسی مرتبط با مناطق زمین گرمایی و همچنین کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب‌گرم، تصاویر حاصل از نسبت‌های بانندی پس از آستانه‌گذاری در آنالیز مولفه اصلی (PCA) قرار گرفت.

کانی‌های مرتبط با دگرسانی حاصل از انرژی زمین گرمایی شامل کانی‌های کائولینیت، مونتوریلونیت، ایلیت و آلونیت به دلیل دارا بودن ارتعاش بنیان‌های Al-OH در محدوده فروسرخ موج کوتاه دارای ویژگی جذبی هستند. در کانی کائولینیت دو ویژگی جذبی در ۲/۱۶ و ۲/۲۰ میکرومتر (منطبق بر باندهای ۶ و ۷ تصویر تلفیقی) مرتبط با ارتعاش Al-OH وجود دارد. کانی‌های مونتوریلونیت و ایلیت در ۲/۲۰ میکرومتر (منطبق بر باند ۷ تصویر تلفیقی) دارای ویژگی جذبی مرتبط با Al-OH هستند. کانی آلونیت نیز در ۲/۱۶ میکرومتر (مطابق با باند ۶ تصویر تلفیقی) دارای جذب اصلی بوده و در ۱/۷ و ۲/۳۲ میکرومتر (مطابق با باندهای ۵ و ۹ تصویر تلفیقی) جذب ضعیف‌تر نشان می‌دهد (شکل ۳) (حسینجانی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ Van der Meer et al., 2014).

کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب‌گرم منطقه تفتان شامل کانی‌های ژیبس، ژاروسیت، کلسدون/اپال و کلسیت (مر و همکاران، ۱۳۸۴)، دارای ویژگی‌های طیفی در محدوده‌های مرئی-فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه هستند (سیفی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Calvin et al., 2003; Rowan & Mars, 2003; Zabcic, 2008; Bishop et al., 2013; Hosseinjanizadeh et al., 2014). کانی ژاروسیت بدلیل انتقالات الکترونی آهن فریک و ارتعاشات بنیان‌های Fe-OH در ۰/۴۳۶ و ۲/۲۶۵ میکرومتر (مطابق با باندهای ۱ و ۸ تصویر تلفیقی) ویژگی جذبی نشان می‌دهد. ژیبس در ۲/۲۱۷ و ۲/۴۱۸ میکرومتر (منطبق بر باندهای ۷ و ۱۰ تصویر تلفیقی) بدلیل ارتعاشات H₂O جذب دارد. در ساختمان آمورف سیلیس اپالی و کلسدون ادخاله آب وجود دارد که باعث ایجاد ویژگی جذبی در محدوده ۲/۲۶-۲/۲۲ میکرومتر (منطبق بر باندهای ۷ و ۸ تصویر تلفیقی) طیف اپال و کلسدون می‌شود. کانی کلسیت در ۲/۳۳ میکرومتر (مطابق باند ۹ تصویر تلفیقی) بدلیل بنیان‌های CO₃ دارای ویژگی جذبی می‌باشد. در تحقیق کنونی، برای شناسایی کانی‌های آلونیت، کائولینیت و کلسیت از معادل نسبت‌های باندی استفاده شده در مطالعه نینومیا (۲۰۰۳) منطبق با مرکز باندهای تصویر تلفیقی استفاده شده است. همچنین برای آشکارسازی سایر کانی‌ها شامل ایلیت، مونتوریلونیت، ژیبس، ژاروسیت و اپال/کلسدون با توجه به بازتاب و جذب‌های موجود در طیف آنها نسبت باندی مناسب اعمال شده است. (معادله‌های ۱ تا ۸).

$$(۲) \text{ ایلیت} = (b6/b7)(b8/b7)$$

$$(۱) \text{ آلونیت} = (b8/b6)(b8/b9)$$

$$(۴) \text{ مونتوریلونیت} = (b8/b7)(b8/b10)$$

$$(۳) \text{ کائولینیت} = (b5/b6)(b9/b7)$$

$$(۶) \text{ ژیبس} = (b9/b7)(b9/b10)$$

$$(۵) \text{ کلسیت} = (b7/b9)(b10/b9)$$

$$(۸) \text{ اپال/کلسدون} = (b6/b7)(b9/b8)$$

$$(۷) \text{ ژاروسیت} = (b3/b1)(b9/b8)$$

نتایج حاصل از نسبت‌های باندی کانی‌های آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونتوریلونیت (معادله‌های ۱ تا ۴) به منظور شناسایی دگرسانیه‌های مرتبط با فعالیت زمین‌گرایی در منطقه تفتان پس از آستانه‌گذاری در آنالیز مولفه اصلی (PCA) قرار گرفت. علاوه بر این شناسایی چشمه‌های موجود در منطقه زمین‌گرایی تفتان، نتایج حاصل از نسبت‌های باندی کانی‌های کلسیت، ژیبس، ژاروسیت و اپال/کلسدون (معادله‌های ۵ تا ۸) نیز پس از آستانه‌گذاری در آنالیز مولفه اصلی (PCA) قرار گرفتند.

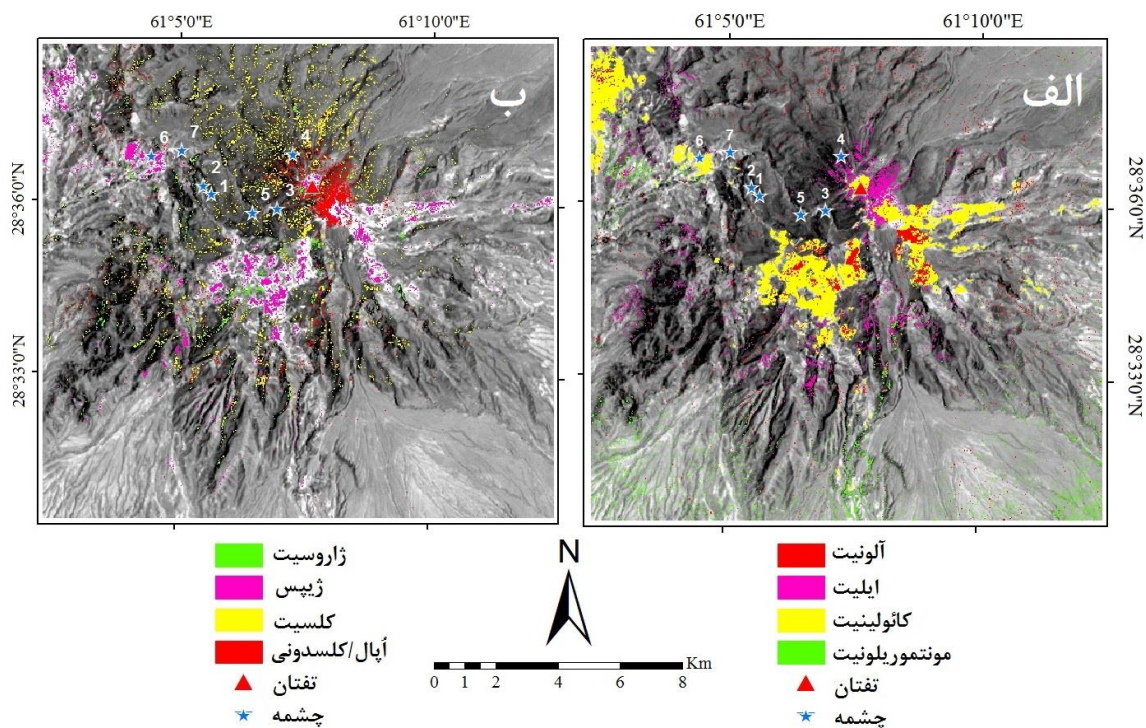
بحث و نتایج

در نتایج حاصل از آنالیز مولفه اصلی (PCA) با استفاده از نسبت‌های باندی مربوط به کانی‌های دگرسانی شامل آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونتوریلونیت، کانی‌های مذکور بارسازی و تفکیک شدند. برطبق بررسی ویژه‌بردار در مولفه‌های اول (PC1) و دوم (PC2) کانی‌های کائولینیت و مونتوریلونیت قابل تفکیک می‌باشند. بطوریکه هر دو کانی در PC1 با علامت مثبت هستند درحالی‌که در PC2 مونتوریلونیت با علامت مثبت و کائولینیت دارای علامت منفی است (جدول ۲). در نتیجه دو کانی مذکور در PC1 با رنگ روشن بارز می‌شوند ولی در PC2 مونتوریلونیت بصورت روشن و کائولینیت بصورت تیره آشکارسازی می‌شوند. با تفریق دو مولفه اول (PC1- PC2) می‌توان دو کانی کائولینیت و مونتوریلونیت را تفکیک نمود. همچنین در مولفه‌های سوم (PC3) و چهارم (PC4) کانی‌های آلونیت و ایلیت قابل جداسازی هستند بطوریکه هر دو کانی در PC4 دارای علامت مثبت می‌باشند درحالی‌که در PC3 آلونیت دارای علامت مثبت و ایلیت با علامت منفی است (جدول ۲). در نتیجه دو کانی مذکور در PC4 با رنگ روشن مشخص می‌شوند ولی در PC3 آلونیت بصورت روشن و ایلیت بصورت تیره بارز می‌شوند. با تفریق این دو مولفه (PC4- PC3) می‌توان دو کانی آلونیت و ایلیت را تفکیک نمود. کانی‌های آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونتوریلونیت بارز شده با رنگ‌های مشخص روی تصویر تک باند (باند قرمز) پلات شده‌اند (شکل ۲ الف).

جدول ۲: مشخصات آماری آنالیز مولفه اصلی با استفاده از نسبت‌های باندی کانیهای آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونتموریلونیت، کلسیت، ژپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی.

کانیهای دگرسانی				ویژه بردار	کانیهای محل چشمه‌های آب گرم			
آلونیت	ایلیت	کائولینیت	مونتموریلونیت		کلسیت	ژپس	ژاروسیت	اپال/کلسدونی
0.21385	0.284057	0.824181	0.440801	PC 1	0.001376	-0.00185	-0.99998	-0.00514
0.422629	0.247241	-0.55468	0.672745	PC 2	0.750971	-0.64825	0.002881	-0.12571
0.567829	-0.81442	0.113856	0.036463	PC 3	0.095455	-0.08182	-0.00482	0.992054
0.673218	0.441482	-0.00962	-0.59311	PC 4	0.653398	0.757014	-0.0005	-0.00044

نتایج بارسازی و تفکیک کانی‌های دگرسانی شامل آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونتموریلونیت توسط روش هیبرید توانست کانی‌های کائولینیت، آلونیت و ایلیت در کوه تفتان را بارز نماید. کائولینیت نسبت به آلونیت و ایلیت محدوده بزرگتری را در برمی‌گیرد (شکل ۲الف). مطالعات میدانی وجود دگرسانی آرژیلیک در کوه تفتان را تایید می‌کنند.



بعلاوه دگرسانی‌های کائولینیتی و آرژیلیکی ناشی از فعالیت محلول‌های گرمایی در کوه تفتان گزارش شده‌اند که در نتیجه فعالیت‌های دودخان‌ها در پلیوسن و کواترن می‌باشند (مهرپرتو و پادیار، ۱۳۸۲؛ Richards et al, 2018). وجود آلونیت و انیدریت موید گذر سیالات عمیق از زون خنثی‌سازی اولیه به همراه مصرف عناصری از قبیل کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم هستند (مر و همکاران، ۱۳۸۴). کانی مونتموریلونیت در قسمت‌های جنوبی کوه تفتان بصورت پراکنده بارز شده است که با رسوبات کواترنری موجود در منطقه مورد مطالعه مطابقت دارند (شکل ۲الف).

در نتایج حاصل از آنالیز مولفه اصلی (PCA) با استفاده از نسبت‌های باندی مربوط به کانی‌های موجود در محل چشمه‌ها شامل کلسیت، ژاپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی، کانیهای مذکور بارزسازی و تفکیک شدند. برطبق بررسی ویژه‌بردار در مولفه اول (PC1) کانی ژاروسیت با علامت منفی (مقدار زیاد) و همچنین در مولفه سوم (PC3) اپال/کلسدونی دارای علامت مثبت (مقدار زیاد) نشان داده شده است (جدول ۲). در نتیجه دو کانی ژاروسیت در PC1 با رنگ تیره و اپال/کلسدونی در PC3 با رنگ روشن بارز شده‌اند. برای بارزسازی ژاروسیت با رنگ روشن PC1 را در ۱- ضرب شده است. همچنین با استفاده از مولفه‌های دوم (PC2) و چهارم (PC4) کانیهای کلسیت و ژاپس قابل تفکیک هستند بطوریکه هر دو کانی در PC4 دارای علامت مثبت هستند درحالی‌که در PC2 کلسیت دارای علامت مثبت و ژاپس با علامت منفی است (جدول ۲). در نتیجه دو کانی مذکور در PC4 با رنگ روشن مشخص می‌شوند ولی در PC2 کلسیت بصورت روشن و ژاپس بصورت تیره بارز می‌شوند. با تفریق این دو مولفه (PC4- PC2) نیز می‌توان دو کانی کلسیت و ژاپس را تفکیک نمود. کانیهای کلسیت، ژاپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی بارز شده توسط روش هیبرید با رنگ‌های مشخص روی تصویر تک باند (باند قرمز) پلات شده‌اند (شکل ۲ب).

طبق نتایج روش هیبرید کانی اپال/کلسدونی در محل کوه تفتان و ژاروسیت در برخی آبراهه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه مخصوصاً آبراهه‌های اطراف کوه تفتان بارزسازی شدند (شکل ۲ب). کانی ژاپس در کوه تفتان و همچنین در قسمت‌های دگرسان شده جنوب‌غرب و شمال‌غرب آن بارز شده است. کانی کلسیت علاوه بر آبراهه‌های جنوب تفتان در شمال این کوه نیز بارز شده است. بارزسازی کانی‌های ژاروسیت، ژاپس و کلسیت در آبراهه‌های جنوب و جنوب‌غرب تفتان بگونه‌ای است که کانی‌های مذکور در بعضی آبراهه‌ها با همدیگر بارز شده‌اند. لازم به ذکر است که وجود کانی‌های اپال/کلسدونی، ژاپس و ژاروسیت در محل چشمه‌های واقع در جنوب و جنوب‌غرب کوه تفتان توسط مر و همکاران (۱۳۸۴) گزارش شده است که با نتایج بارز شده توسط روش هیبرید انطباق دارد. بعلاوه مقادیر زیادی کاتیون‌های K، Na، Mg، Ca، Fe و Al در چشمه‌های آب‌گرم شدیداً اسیدی و نسبتاً اسیدی موجود در دامنه‌های کوه تفتان گزارش شده است (مختاری، ۱۳۸۸).

نتیجه‌گیری

روش منسوب به هیبرید که در این مطالعه بر روی تصویر تلفیقی استر- لندست ۷ اعمال گردید، کانی‌های دگرسانی و کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب‌گرم را به خوبی بارزسازی کرد. کانیهای ایلیت و کائولینیت در کوه تفتان و شمال‌غرب آن بارز شدند و این در حالی‌ست که مطالعات میدانی نیز وجود دگرسانی آرژیلیک را در کوه تفتان تایید می‌کنند. موقعیت تعدادی از چشمه‌های آب-گرم با کانیهای بارز شده حاوی Ca، Fe و K مانند کلسیت، ژاپس و ژاروسیت هماهنگی داشته بطوری که موقعیت این چشمه‌ها در دامنه‌های کوه تفتان واقع شده‌اند. با توجه به نتایج مطالعات دورسنجی و میدانی می‌توان نتیجه گرفت که آثار و دگرسانی‌های ناشی از وجود انرژی زمین‌گرمایی در کوه تفتان، این منطقه را از نظر ژئوتوریسم و اکتشافی غنی کرده است.

مراجع

- بومری، م.، ۱۳۸۴، "بررسی منابع انرژی زمین گرمایی و کانی سازی آتشفشان تفتان با استفاده از ایزوتوپ های پایدار آب"، مجله جغرافیا و توسعه، بهار و تابستان، ۴۰-۲۵.
- حسینجانی‌زاده، م.، هنرمند، م.، ۱۳۹۷، "بررسی‌های دورسنجی و مغناطیس هوابرد در ذخایر مس پورفیری برای شناسایی مناطق با تمرکز بالای کانه‌زایی طلا، مطالعه موردی بخش میانی کمر بند دهج ساردوئیه کرمان، ایران"، زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۰ (۱)، ۲۵۴-۲۳۷.
- حقیقی، ح.، هنرمند، م.، حسینجانی‌زاده، م.، عسکری ملک آباد، ف.، ۱۳۹۵، "شناسایی پتانسیل‌های زمین گرمایی با استفاده از سنجش از دور در بخش جنوبی منطقه آتشفشانی بزمان"، پنجمین کنفرانس سالانه انرژی پاک، کرمان، ایران.
- سیفی، ع.، حسینجانی‌زاده، م.، رنجبر، ح.، هنرمند، م.، ۱۳۹۶، "بررسی کانیهای زهاب اسیدی با استفاده از ویژگیهای طیفی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مطالعه موردی: معدن دره‌زار، استان کرمان)"، مجله محیط شناسی، ۴۳ (۱)، ۳۱-۴۳.
- شاکری، ع.، قریشی نیا، س.ک.، مهرابی، ب.، ۱۳۹۴، "هیدروژئوشیمی عناصر نادر خاکی در چشمه‌های گرمابی و سرد آتشفشان تفتان"، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۵، ۳۹-۲۸.
- مختاری، ز.، ۱۳۸۸، "شیمی گازهای آتشفشانی و چشمه‌های آب گرم آتشفشان تفتان، جنوب شرق ایران: نگرشی زیست محیطی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- مختاری، ز.، احمدی، ع.، ۱۳۹۱، "ترکیب شیمیایی گازهای خروجی و فعالیت‌های پساآتشفشانی تفتان، جنوب شرق ایران"، ژئوشیمی، ۱، ۵۸-۵۰.
- مر، ف.، شاکری، ع.، کمپانی زارع، م.، رئیسی، ع.، ۱۳۸۴، "زمین آب شیمی و زمین داماسنجی چشمه های آب گرم و معدنی دامنه جنوبی و جنوب غربی تفتان". مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ۴۰-۲۸.
- معین وزیری، ح.، ۱۳۸۳، "دیبچه ای بر ماگماتیسیم ایران"، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، تهران، چاپ دوم، ۴۴۰.
- مهرپرتو، م.، پادپار، ف. (۱۳۸۲). نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تفتان. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مودن زاده، گ.، شهریار، س.، ارومیه ای، ع.، ۱۳۸۷، "بررسی سازوکار هندسی گسل‌های منطقه ژئوترمال شمال غرب سبلان با استفاده از فناوری GIS، علوم زمین، ۴، ۸۲-۷۱.

References

- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., King, S.J., Brown, A.J., Swayze, G., 2013, "Spectral Properties of Ca-sulfates: Gypsum, Bassanite and Anhydrite", Submitted to American Mineralogist. 48.
- Calvin, W.M., Littlefield, E.F., Kratt, C., 2015, "Remote sensing of geothermal-related minerals for resource exploration in Nevada", *Geothermics*, 53, 517–526.
- Department of the Interior U.S. Geological Survey., 2015, "Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance Product (AST_L1T)", *AST_L1T Product User's Guide*, Version 1.0, 74.
- Eskandari, A., De Rosa, R., Amini, S., 2015, "Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306, 41–57.
- Hosseinjanzadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F., Yusta, I., 2014, "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.
- ITT Visual Information Solutions., 2008, "FLAASH Module User's Guide", *FLAASH Module*, Version 4.5, 42.
- Kratt, C., Calvin, W.M., Coolbaugh, M.F., 2010, "Mineral mapping in the Pyramid Lake basin: Hydrothermal alteration, chemical precipitates and geothermal energy potential", *Remote Sensing of Environment*, 114, 2297–2304.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2009. *Landsat 7 Science Data User's Handbook*.

Ninomiya, Y., 2003, "A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data", Proceedings of IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'03, 3, 1552–1554.

Richards, J.P., Razavi, A.M., Spell, T.L., Locock, A., Sholeh, A., Aghazadeh, M., 2018, "Magmatic evolution and porphyry–epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran", Ore Geology Reviews, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.018>.

Rowan, L.C., Mars, J.C., 2003, "Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data", Remote Sensing of Environment, 84, 350 – 366.

Van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkerslooth, C., Wechsler, C., 2014, "Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 33, 255–269.

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, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

Remote Sensing of Geothermal-Related Minerals for Geotourism and Resource Exploration; Taftan, Southeast of Iran

Aliyeh Seifi, Mahdiah Hosseinjanizadeh, Zahra Mokhtari

Abstract

Taftan possess great value for geotourism and resource exploration activities due to existence of different fumarole emission, hot spring, volcanic rocks and altered area. The aim of this study is identification of surface key minerals associated with geothermal resources in Taftan, southeast of Iran, using ASTER and Landsat 7 images. A combination of Landsat 7 visible-near infrared and ASTER short-wave infrared bands (called combined image) was used to study mineralogy of alteration zones and hot springs. A hybrid method, consisting of band ratio and principal component analysis, was used for mapping minerals in altered areas and the hot springs deposits. Altered minerals were detected in argillic alteration zone in Taftan. The situation of a number of hot springs in slopes of Taftan was coordinated with minerals containing Ca, Fe and K such as calcite, gypsum and jarosite. According to the results of remote sensing and field data, it can be concluded that the alteration key minerals and effects caused by geothermal energy in Taftan have enriched this area for geotourism and exploration activities.

Keywords

ASTER; Landsat-7; Geothermal; Geotourism; Sistan and Balouchistan