

ترکیب روش‌های دورسنجی و فرکتالی برای شناسایی دگرسانی‌ها در محدوده تیرکا، شمال خاوری ایران

مینا زیباد^۱، پیمان افضل^۲، محسن پورگرمانی^۳، رضا نوری^۴ و محمدرضا جعفری^۵

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی نفت و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران
^۳استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران
^۴دکتر، گروه معدن، شرکت عمران مومان چابهار، تهران، ایران
^۵استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

چکیده

محدوده تیرکا در استان سمنان واقع شده و بخشی از کمربند ماگمایی ترو-چاه‌شیرین که بیشتر از رسوبات پالئوژن و واحدهای سنگی آتشفشانی با ترکیب حدواسط تا بازیک ائوسن میانی-بالایی تشکیل شده است. هدف این پژوهش، بارسازی دگرسانی‌های منطقه با استفاده از ترکیب روش‌های سنجش از دور و فرکتالی می‌باشد. بر این اساس ابتدا پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) با استفاده از روش انطباق سیمای طیفی برای تعیین دگرسانی‌های اکسید آهن، پروپیلیتیک، فیلیک و آرژیلیک انجام شد. سپس روش فرکتالی مقدار - تعداد برای رده‌بندی دگرسانی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده از روش فرکتالی نشان داد که روند اصلی دگرسانی‌های محدوده شمال خاوری - جنوب باختری با شش جامعه برای دگرسانی اکسید آهن، چهار جامعه برای هر یک از دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک و پنج جامعه برای دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشند. بی‌هنجاری‌های شدید از دگرسانی‌ها با مقادیری با ارزش بیش از ۲۲۳ برای اکسید آهن، ۲۰۴ برای آرژیلیک، ۱۹۹ برای پروپیلیتیک و ۱۹۹ برای فیلیک محاسبه شد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مشاهدات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی شامل مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی بر روی مقاطع نازک و صیقلی انجام شد. نتایج به دست آمده از این مطالعات نیز مناطق دگرسانی‌های حاصله را تأیید کرد. همچنین با استفاده از ماتریس Logratio داده‌های به دست آمده از تلفیق روش‌های سنجش از دور، هندسه فرکتال و مدل‌های زمین‌شناسی مورد ارزیابی و راستی‌آزمایی قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸
 تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

مدل‌سازی فرکتال
 انطباق سیمای طیفی
 دگرسانی گرمایی
 تیرکا

۱- پیش‌نوشتار

داده‌های سنجش از دور روش مفیدی برای غلبه بر عوارض و محدودیت‌های مربوط به اکتشاف مواد معدنی و نقشه‌برداری زمین‌شناسی در مناطق غیرقابل دستیابی هستند (Beiranvandpour et al., 2019). این روش می‌تواند به مطالعه مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی و همچنین مناطق وسیع‌تر در مقایسه با دیگر روش‌های اکتشاف از جمله روش‌های ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی کمک شایانی نماید. تصاویر ماهواره‌ای ابرطیفی برای یافتن دگرسانی گرمایی مرتبط با مناطق کانه‌زایی پردازش می‌شوند که این روش قابل جایگزینی با روش‌های سنتی مانند روش مبتنی بر میدان برای شناسایی و طبقه‌بندی مواد معدنی می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای استر با استفاده از روش‌های مختلف پردازش مانند انطباق سیمای طیفی SFF (Spectral feature fitting) دورنمایی از پیشرفت در اکتشاف مواد معدنی را ارائه می‌دهند (Mars and Rowan, 2006; Porwal and González-Alvarez, 2019).

انطباق سیمای طیفی (SFF) یک روش مبتنی بر جذب است که توسط Clark et al. (1991) پیشنهاد شد. روش انطباق سیمای طیفی از روش کمترین مربعات برای مقایسه طیف‌های تصویر با طیف مرجع برای شناسایی مواد معدنی استفاده می‌کند. هر یک از سنگ‌های دگرسان شده به دلیل مجموعه مواد معدنی تولید شده دارای ویژگی‌های جذب طیفی مشخصی هستند و توسط حسگرهای ویژه تأیید می‌شوند (Hunt and Ashley, 1979; Ninomiya and Fu, 2019). مناطق دگرسانی گرمایی با استفاده از طیف‌های مرجع که از کتابخانه طیفی استخراج شده است، بر اساس هر پیکسل و به روش انطباق سیمای طیفی مشخص شده که برای مقایسه طیف‌های مرجع با طیف‌های تصویر به کار برده می‌شود (Rajendran and Nasir, 2017). در این روش، ابتدا پیوستار در طیف‌های مرجع و تصویر حذف می‌شوند. سپس با روش حداقل مربعات، شکل و عمق ویژگی‌های طیفی

صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی و همچنین ماتریس Logratio راستی آزمایی شد و مورد تأیید قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

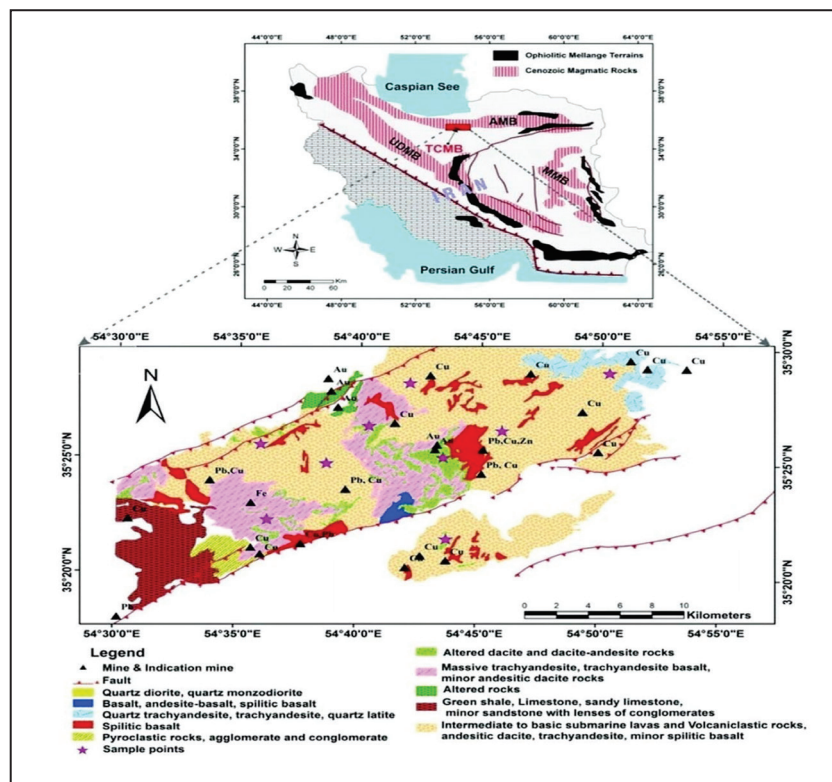
۲-۱. جایگاه زمین‌شناسی

– **کمر بند ماگمایی تروود - چاه شیرین:** منطقه تیرکا در شمال باختر روستای تروود در استان سمنان واقع شده است. این منطقه بخشی از کمر بند ماگمایی تروود - چاه شیرین (Toroud-Chahshirin Magmatic Belt) (TCMB) می‌باشد که در بخش شمالی زون ساختاری ایران مرکزی قرار گرفته است. کمر بند ماگمایی تروود - چاه شیرین یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین کمر بندهای ماگمایی در شمال خاوری ایران است که از سنگ‌های آذرین ترشیری تشکیل شده است. همچنین در این منطقه بیرون‌زدگی‌های پراکنده‌ای از سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک و مزوزویک وجود دارد (Alavi, 2007; Ghorbani and Ovissi, 2016). یک ساختار ستبر از واحدهای سنگی آتشفشانی رسوبی و آتشفشانی به سن پالئوسن تا ائوسن میانی همراه با دایک‌های متعددی در منطقه مشاهده می‌شود (Yasrebi et al., 2017; Feyzollahi et al., 2018). مدل‌های ساختاری منطقه توسط دو گسل اصلی امتدادلغز با روند شمال خاوری - جنوب باختری، گسل تروود در جنوب و گسل انجیلو در شمال کنترل می‌شود. این گسل‌ها نقش مهمی در کنترل کانه‌زایی، جایگیری رگه‌ها و ایجاد دایک‌های گابرویی در منطقه دارند (Fard et al., 2006; Noori et al., 2019). رخدادهای متعددی از کانه‌زایی رگه‌ای اپی‌ترمال پلی‌متال از جمله کانه‌زایی مس، طلا، سرب و روی در کمر بند ماگمایی تروود - چاه شیرین رخ داده است. به همین دلیل کمر بند ماگمایی تروود - چاه شیرین به عنوان یکی از مهم‌ترین ایالت‌های متالورژی ایران شناخته می‌شود (Shamanian et al., 2004; Fard et al., 2006; Rastad et al., 2000; Noori et al., 2019). منطقه تیرکا نیز یک منطقه آنومال بوده که در این ایالت متالورژی واقع شده است.

طیف تصویر با یک طیف مرجع مقایسه می‌شود (هاشمی تنگستانی و رضایی، ۱۳۹۱). افزون بر این، برای طیف‌های مرجع، یک تصویر مقیاس و RMS (میانگین مربعات ریشه Root Mean Square) ساخته می‌شود. از نتایج تصویر مقیاس، برای تشخیص مناطقی با بهترین قابلیت اطمینان با طیف‌های مرجع استفاده می‌شود (Othman and Gloaguen, 2017).

مدل‌سازی فرکتال و مولتی‌فرکتال که توسط Mandelbrot (1983) ارائه شد، به طور گسترده‌ای در شاخه‌های مختلف علوم زمین به ویژه در تشخیص مناطق دارای بی‌هنجاری کاربرد دارد (Turcotte, 1986; Agterberg et al., 1993; Cheng et al., 1994; Agterberg, 1995; Afzal et al., 2016; Chen et al., 2017). چندین روش مختلف از مدل‌سازی فرکتال در تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی به کار برده می‌شود، از جمله روش‌های مقدار - محیط (C-A) توسط (Cheng et al., 1994)، تعداد - اندازه (N-S) توسط Mandelbrot (1983)، مقدار - فاصله (C-D) توسط Li et al. (2003)، مقدار - حجم (C-V) توسط (Afzal et al., 2011) و مقدار - تعداد (C-N) توسط (Hassanpour and Afzal, 2013). به طور کلی، روش هندسه فرکتال به عنوان یک روش مؤثر برای جداسازی دقیق مرزهای بین عوارض کانه‌زایی در اکتشافات زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود (Yasrebi and Hezarkhani, 2019). در این بین، روش فرکتال مقدار - تعداد (C-N) (Concentration-Number Fractal Model) برای محاسبه آستانه‌های کمی در اکتشافات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Cheng, 2000; Afzal et al., 2010; Hassanpour and Afzal, 2013; Aramesh Asl et al., 2015; Karami and Afzal, 2015; Daneshvar Saein, 2017; Ostadhosseini et al., 2018; Nazarpour, 2018; Yasrebi and hezarkhani, 2019).

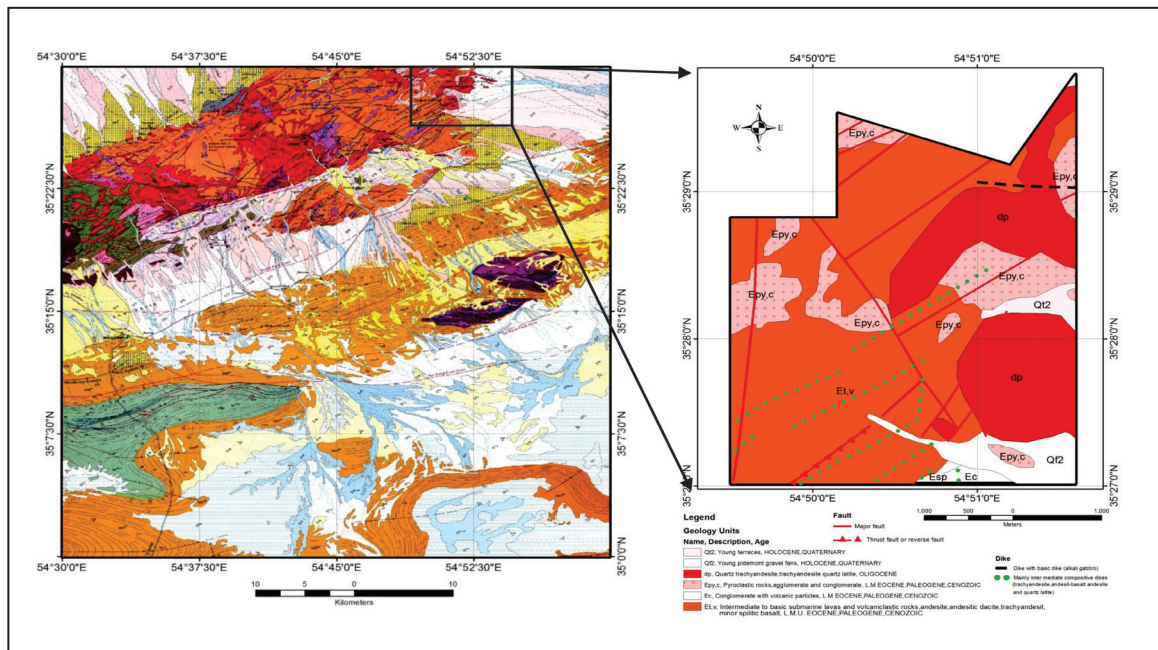
در این نوشتار، تصاویر ماهواره‌ای استر به منظور طبقه‌بندی مناطق دگرسانی گرمایی در منطقه تیرکا (شمال خاور ایران) با استفاده از مدل فرکتال مقدار - تعداد مورد مطالعه قرار گرفت. پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر با استفاده از روش انطباق سیمای طیفی (SFF) انجام شد و سپس نتایج به دست آمده با استفاده از مشاهدات



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی کمر بند ماگمایی تروود-چاه شیرین (TCMB) در شمال ایران (Eshraghi and Jalali, 2006).

۱) گدازه‌های زیردریایی حدواسط تا بازیگ و سنگ‌های آذرآوری، آندزیت، داسیت آندزیتی، تراکی آندزیت، بازالت اسپیلیتیک به سن ائوسن، ۲) کنگلومرا به سن ائوسن پایینی - میانی همراه با ذرات آتشفشانی، ۳) آگلومرا و کنگلومرای پیروکلاستیک به سن ائوسن پایینی - میانی، ۴) کوارتز تراکی آندزیت به سن الیگوسن، تراکی آندزیت کوارتز لاتیت، ۵) گراول‌های جوان به سن هولوسن و ۶) تراس‌های جوان هولوسن. همچنین، تعداد زیادی از دایک‌های حدواسط تا بازیگ در این منطقه وجود دارد. گروه دیگری از سنگ‌های این منطقه را گابروهای با ترکیب میکروآلکالین بازیگ تشکیل می‌دهند.

— **زمین‌شناسی تیرکا:** منطقه تیرکا در شمال خاوری برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان واقع شده که در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه که از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان گرفته شده است؛ ذخایر و نهشته‌های سنوزویک در این منطقه در راستای فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن پایینی رخ داده است. این منطقه از رسوبات پالئوژن و واحدهای سنگی آتشفشانی به سن ائوسن میانی و بالایی تشکیل شده است. این سنگ‌ها دارای ترکیب متفاوتی از سنگ‌های بازیگ تا حدواسط می‌باشند (Eshraghi and Jalali, 2006). ترکیب این سنگ‌ها به شرح زیر است:



شکل ۲- موقعیت محدوده تیرکا در شمال خاوری برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان.

۲-۲. سنجش از دور

دگرسانی‌های گرمایی معمولاً از داده‌های SWIR چندطیفی استفاده می‌شود. باندهای دگرسانی‌های گرمایی به منظور توصیف ویژگی‌های جذب کانی‌ها و مواد معدنی که توسط فرآیندهای دگرسانی گرمایی ساخته می‌شوند، تشکیل شده است (شکل ۳). بسیاری از عوامل مانند تأثیرات جوی و توپوگرافی ممکن است بر روی سیگنال اندازه‌گیری شده توسط سنسور تأثیرگذار باشد. بنابراین در این پژوهش اصلاحات جوی، توپوگرافی و هندسی (ژئومتری) بر روی تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. همچنین، اصلاحات درخشندگی (رادانانس) مانند طول موج که برای تصاویر چند طیفی ضروری است، با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.4 صورت گرفت.

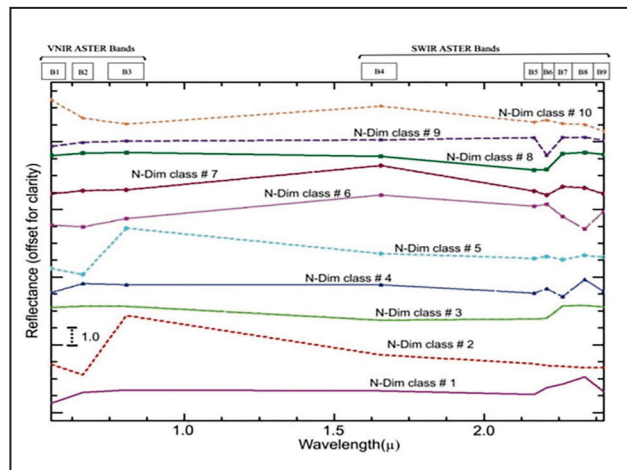
— **روش انطباق سیمای طیفی (SFF):** روش انطباق سیمای طیفی (SFF) یک الگوریتم مبتنی بر قابلیت جذب است که برای توصیف داده‌های سنجش از دور استفاده می‌شود (Mars and Rowan, 2006; Azizi et al., 2010; Hashim, 2012; Poormirzaee and Mohammady Oskouei, 2010; Beiranvandpour and Oskouei and Busch, 2012). این الگوریتم با استفاده از روش تقریب کمترین مربعات و داده‌های حذف شده از طیف پیوسته، طیف‌های پیکسلی را با طیف‌های مرجع مطابقت می‌دهد (Clark et al., 1991; Dehaan and Taylor, 2002). این روش بر پایه انطباق طیف‌های هدف و پیکسل از طریق ویژگی‌های جذب منحصر به فرد در طیف‌ها استوار است. به این ترتیب که طیف هدف

علم سنجش از دور با بهره‌گیری از رفتارهای طیفی منحصر به فرد کانی‌ها و واحدهای سنگی سطح زمین، به عنوان یک کلید اکتشافی در شناسایی مناطق امیدبخش و دستیابی به ذخایر معدنی عمل می‌کند (Kurse et al., 2003; Zamyad et al., 2019). سنجش از دور توسط مطالعه تصاویر طیفی ثبت شده به وسیله سنجنده‌های مختلف انجام می‌گیرد. تکنیک‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای امکان تشخیص تفاوت طیفی سنگ‌های دگرسان شده با سنگ‌های دگرسان نشده و معرفی مناطق دگرسان شده را فراهم می‌کند (عسگری، ۱۳۹۳). سنجش از دور نقش مهمی در اکتشاف اولیه کانسارها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Beiranvandpour and Hashim, 2012). در این تحقیق، مطالعات سنجش از دور در راستای بارزسازی دگرسانی‌های گرمایی با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای ASTER در محدوده تیرکا انجام شد.

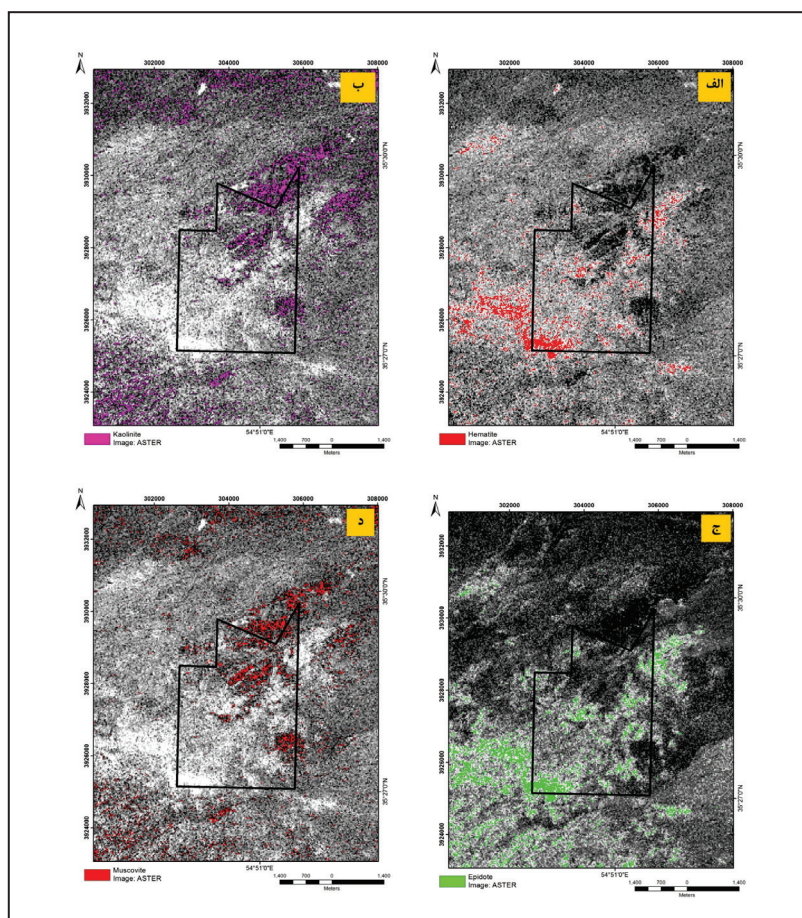
تصاویر ماهواره‌ای ASTER برای نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی گرمایی مانند اکسید آهن، آرزلیک، فیلیک و پروپیلیتیک در سطح پیکسل و زیر پیکسل توسط باندهای طیفی VNIR + SWIR و به منظور مطالعات سنجش از دور به کار برده شد. به عنوان باندهای ورودی به SFF، باندهای VNIR + SWIR که مشخص‌ترین ویژگی‌های طیفی مشترک سنگ‌های دگرسان شده را تشکیل می‌دهد، انتخاب شدند. بیشتر سنگ‌های دگرسان شده دارای خاصیت جذب انحصاری در ناحیه SWIR طیف الکترومغناطیسی هستند. برای نقشه‌برداری

یک ماده معدنی مشخص می‌شود که دارای ویژگی‌های جذب طیفی مشخص است (Mars and Rowan, 2006). دگرسانی فلیک به طور معمول توسط کانی ایلیت، موسکوویت و کوارتز مشخص می‌شود. دگرسانی آرژلیک شامل کانی‌های کائولینیت، آلونیت و مونت‌موریلونیت است. در منطقه پروپلیتیک، طیف بازتاب مجموعه مواد معدنی معمولاً توسط اپیدوت، کلریت و کربنات مشخص می‌شود. دگرسانی اکسید آهن حاوی هماتیت، گوتیت و لیمونیت است. شکل ۴ مناطق دگرسانی گرمایی (اکسید آهن، آرژلیک، پروپلیتیک و فلیک) را که با روش انطباق سیمای طیفی در منطقه تیرکا شناسایی شده است، نشان می‌دهد.

با توجه به طول موجی که دارد بر روی طیف مرجع جابه‌جا شده و در موقعیت جدید تطبیق پیدا می‌کند. افزون بر این، در این تکنیک برای طیف‌های مرجع، یک تصویر مقیاس و یک تصویر خطای مربع جذر میانگین (RMS) شکل می‌گیرد. از نتایج تصویر مقیاس برای تعریف مناطقی با بهترین سازگاری با طیف‌های مرجع استفاده می‌شود (Clark and Roush, 1984; Clark et al., 1990, 1991, 1992; Barak et al., 2018). در این تحقیق، آن دسته از باندهایی که نشان‌دهنده ویژگی‌های طیفی مواد معدنی و کانی‌های مختلف هستند، به عنوان باندهای ورودی به SFF انتخاب شدند. مناطق دگرسانی گرمایی توسط مجموعه‌های معدنی شامل حداقل



شکل ۳- طیف‌های مرجع دگرسانی‌های گرمایی براساس کتابخانه سازمان زمین‌شناسی آمریکا.



شکل ۴- نمایش دگرسانی‌های منطقه با استفاده از پردازش تصاویر سنجنده ASTER به روش SFF؛ الف) کانی هماتیت مربوط به دگرسانی اکسید آهن؛ ب) کانی کائولینیت مربوط به دگرسانی آرژلیک؛ ج) کانی اپیدوت مربوط به دگرسانی پروپلیتیک و د) کانی موسکوویت مربوط به دگرسانی فلیک.

۳-۲. روش هندسه فرکتال مقدار - تعداد (C-N)

مهم‌ترین بحث در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، تعیین حد زمینه برای هر عنصر در منطقه و جدا کردن زمینه از بی‌هنجاری‌های عناصر مختلف است که یکی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده برای این امر، روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال می‌باشد (Zamyad et al., 2018; Farahmandfar et al., 2020). روش‌های آماری فرکتال به عنوان یک روش قابل توجه برای تفکیک دقیق مرز بین ویژگی‌های معدنی در اکتشافات زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود (Yasrebi and Hezarkhani, 2019).

روش هندسه فرکتال توسط Mandelbrot (1983) به منظور جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه ارائه شد. روش‌های فرکتال جزئی از روش‌های ساختاری جداسازی بی‌هنجاری از زمینه هستند و با توجه به اینکه در این روش، موقعیت فضایی نمونه‌ها در تعیین مناطق بی‌هنجاری تأثیر دارد؛ نسبت به روش‌های غیرساختاری مانند روش‌های آماری تک متغیره و دو متغیره برتری دارند (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۱). در روش‌های هندسه فرکتال، رفتار مولتی‌فرکتالی داده‌های ژئوشیمیایی مشخص می‌شود که نشان‌دهنده روابط زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، کانی‌سازی و غنی‌شدگی یک عنصر است (Afzal et al., 2010; Sadeghi et al., 2012; Hassanpour and Afzal, 2013; Hassanpour and Afzal (2013) برای اولین بار توسط (C-N) مقدار - تعداد فرکتال ارائه شد. روش فرکتالی مقدار - تعداد یک از روش‌های مورد استفاده در تفکیک رگه‌های پرمقدار از کم‌مقدار می‌باشد. مزیت روش فرکتالی مقدار - تعداد بر دیگر روش‌های سنتی، توجه به هندسه فرکتال و در نظر گرفتن مقدار عنصر اصلی و تعداد آن می‌باشد که می‌تواند در جدایش رگه‌های پرمقدار از دیگر رگه‌ها راهگشا باشد (Afzal et al., 2011; Hassanpour and Afzal, 2013; Farahmandfar et al., 2020). اساس این روش بر پایه رابطه معکوس میان مقدار و فراوانی تجمعی هر مقدار و مقدارهای بالاتر از آن است. این روش به صورت رابطه زیر به کار گرفته می‌شود:

$$N(\geq \beta) \propto \beta^{-\gamma} \quad (1)$$

در رابطه بالا $N(\geq \beta)$ برابر تعداد نمونه‌هایی است که دارای مقدار مساوی و بالاتر از β هستند. β برابر مقدار عناصر مورد مطالعه و γ برابر بعد فرکتال است. مهم‌ترین حسن این روش در این است که قبل از تخمین و با داده‌های خام اکتشافی محاسبات را انجام می‌دهد و نیازی به پیش‌پردازش داده‌ها نمی‌باشد (Hassanpour and Afzal, 2013).

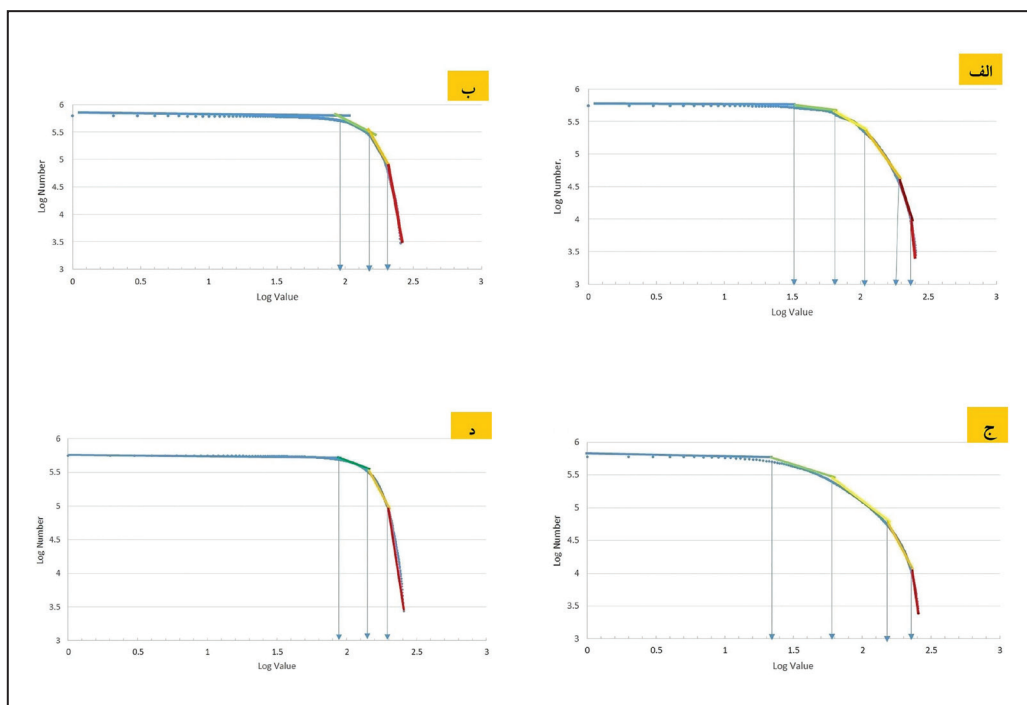
۴-۲. کاربرد روش فرکتال C-N در پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER

در این روش یک تصویر چندطیفی از مجموعه‌ای از پیکسل‌ها تشکیل شده که با مقدار (PV) مشخص شده است. از روش هندسه فرکتال C-N می‌توان برای ارائه نمایش تفاوت‌های یک تصویر بر اساس مقادیر پیکسل و توزیع بسامد آن و همچنین ویژگی‌های مکانی و هندسی الگوهای تصویر استفاده کرد (Cheng and Li, 2002). این روش به ایجاد رابطه توانی بین مناطق (A): تعداد پیکسل‌ها با مقادیر (PV) بالاتر از یک آستانه مشخص ضرب شده در منطقه پیکسل) و مقادیر (PV) آستانه کمک می‌کند. این رابطه توانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A(PV \geq s) \propto PV - \alpha \quad (2)$$

جایی که A (PV) محدوده‌ای را که توسط پیکسل‌ها اشغال شده همراه با مقادیر PV بزرگ‌تر از یک آستانه مشخص نشان می‌دهد. در این فرمول α نیز بعد فرکتال است (Cheng et al., 1994; Cheng and Li, 2002). نمودار لگاریتمی A (PV) در مقابل PV می‌تواند به یک شکل چند طیفی تشکیل شده از یک سری خطوط مستقیم یا بخش منجر شود. هر بخش یک شاخص از یک جمعیت مانند شدت دگرسانی گرمایی است. هر بخش دارای مقادیر آستانه بالا و پایین است که برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده می‌شود.

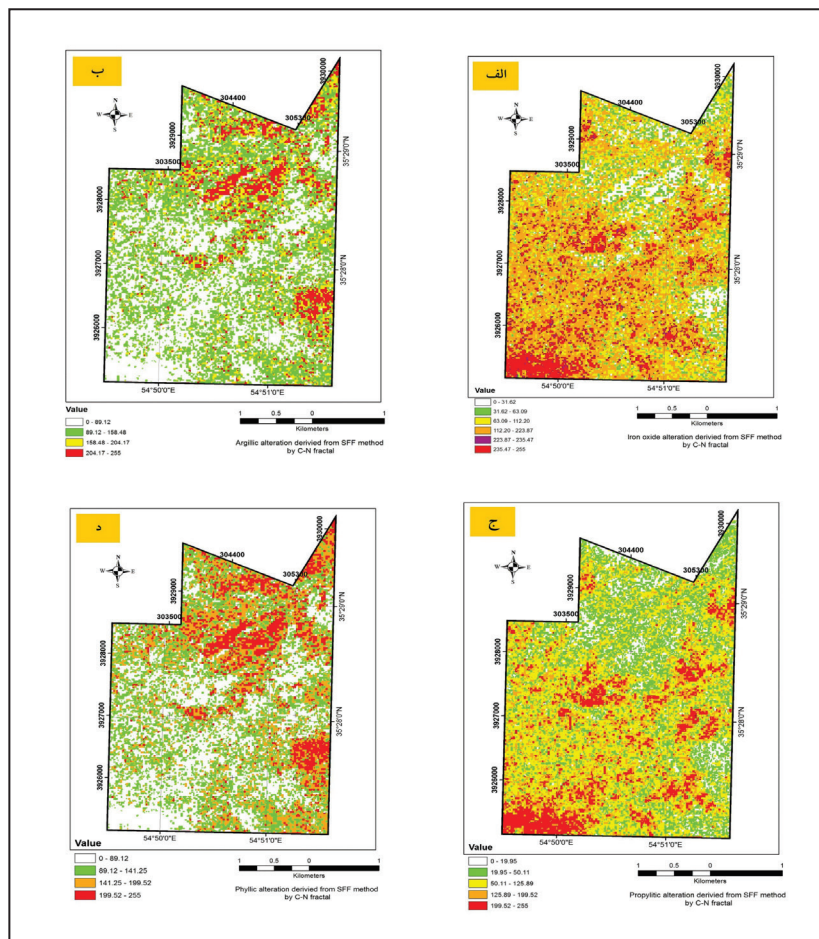
در این تحقیق، از روش هندسه فرکتال مقدار - تعداد (C-N) به عنوان مدل فرکتال PV-A به منظور تمرکز بیشتر برای تقسیم‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. بر اساس روش هندسه فرکتال مقدار - تعداد و با استفاده از محاسبه ارزش پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای، نمودارهای لگاریتمی برای هر یک از دگرسانی‌ها ترسیم شد (شکل ۵).



شکل ۵- نمودارهای لگاریتمی. الف) دگرسانی اکسید آهن؛ ب) دگرسانی آرتزلیک؛ ج) دگرسانی پروپیلیتیک؛ د) دگرسانی فلیک.

بالای آن دارای ارزش‌های پیکسلی با مقادیر بالاتر از ۲۰۴ می‌باشد. همچنین پنج جمعیت برای دگرسانی پروپیلینیک تشخیص داده شد که حد زمینه آن دارای مقادیر پیکسلی بین ۵۰-۰ است. شدت کم این دگرسانی دارای مقادیر پیکسل بین ۱۲۵-۵۰ می‌باشد. شدت متوسط این دگرسانی با ارزش‌های پیکسلی بین ۱۹۹-۱۲۵ و شدت زیاد آن با مقادیر پیکسل بالاتر از ۱۹۹ تشخیص داده شد. دگرسانی فلیک دارای چهار جمعیت بوده که حد زمینه آن شامل ارزش‌های پیکسل با مقادیر کمتر از ۸۹ است. شدت کم این دگرسانی با ارزش‌های پیکسلی بین مقادیر ۸۹ تا ۱۴۱ می‌باشد. دگرسانی فلیک با شدت متوسط دارای ارزش‌های پیکسلی با مقادیر بین ۱۴۱ تا ۱۹۹ بوده و شدت بالای آن دارای ارزش‌های پیکسلی با مقادیر بالاتر از ۱۹۹ می‌باشد (شکل ۶).

پس از تلفیق روش‌های انطباق سیمای طیفی (SFF) و هندسه فرکتال مقدار - تعداد (C-N)، مناطق دگرسانی‌های گرمایی منطقه به دست آمد. بر این اساس، شش جمعیت برای دگرسانی اکسید آهن مشخص شد که حد زمینه برای این دگرسانی برای ارزش‌های پیکسل بین مقادیر ۶۳-۰ است، شدت پایین برای ارزش‌های پیکسل بین مقادیر ۱۱۲-۶۳، شدت متوسط دگرسانی دارای مقادیری بین ۲۲۳-۱۱۲ و شدت بالای دگرسانی مربوط به ارزش‌های پیکسلی برای مقادیر بالاتر از ۲۲۳ می‌باشد. دگرسانی آرژیلینیک دارای چهار جمعیت بوده که حد زمینه آن شامل ارزش‌های پیکسل با مقادیر کمتر از ۸۹ است. شدت کم این دگرسانی با ارزش‌های پیکسلی بین مقادیر ۸۹ تا ۱۵۸ تشخیص داده شد. دگرسانی آرژیلینیک با شدت متوسط دارای ارزش‌های پیکسلی با مقادیر بین ۱۵۸ تا ۲۰۴ بوده و شدت



شکل ۶- نقشه جوامع توزیع بر اساس روش هندسه فرکتال C-N. الف) دگرسانی اکسید آهن؛ ب) دگرسانی آرژیلینیک؛ ج) دگرسانی پروپیلینیک؛ د) دگرسانی فلیک.

۳- مشاهدات صحرایی

شناسایی شدند. به طور کلی، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی نتایج به دست آمده از مطالعات سنجش از دور و هندسه فرکتال را تأیید کرد.

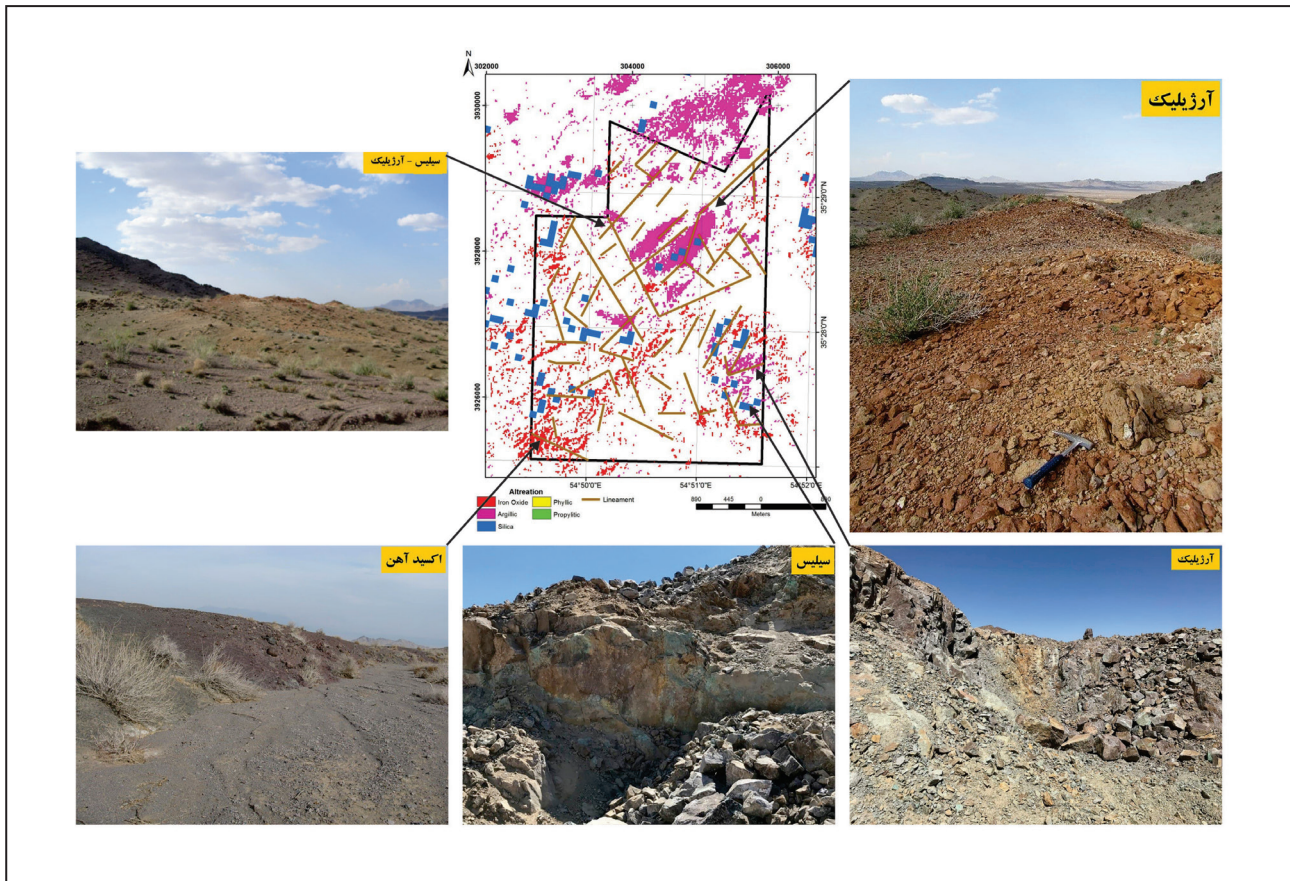
۴- راستی آزمایی نتایج حاصل با استفاده از ماتریس Logratio

در این بخش نتایج به دست آمده از روش‌های سنجش از دور، هندسه فرکتال، مشاهدات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور و برای راستی آزمایی نتایج مورد اشاره، ماتریس Logratio که اولین بار توسط Carranza (2011) ارائه شد؛ مورد استفاده قرار گرفت. Carranza (2011) روشی را برای محاسبه هم‌پوشانی و یا همبستگی فضایی بین دو مدل باینری ارائه

برای ارزیابی نتایج به دست آمده، مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی و آنالیزهای آزمایشگاهی در منطقه به‌ویژه در مناطق دگرسانی گرمایی شناسایی شده انجام شد. در این مرحله، از مناطق دگرسانی مشخص شده توسط روش‌های سنجش از دور بازدید به عمل آمد و از واحدهای سنگی منطقه نمونه‌گیری صورت گرفت. براساس مشاهدات صحرایی، منطقه مورد مطالعه حاوی بخش‌های مهمی از دگرسانی اکسید آهن، آرژیلینیک و سیلیس می‌باشد (شکل ۷). مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی بر روی مقاطع نازک و صیقلی انجام شد (شکل ۸). مقاطع نازک کانی‌های دگرسان شده مانند کلریت، کانی‌های رسی و سرسیت را نشان می‌دهد که از دگرسانی فلدسپارها تشکیل شده‌اند. در مقاطع صیقلی نیز کانی‌های اکسید آهن

دقت (Overall Accuracy) برخوردار خواهد بود. بر همین اساس داده‌های مربوط به دگرسانی آرژلیک و فلیک با استفاده از مؤلفه‌های ماتریس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از محاسبه مؤلفه‌های ماتریس Logratio نشان داد که برای دگرسانی آرژلیک ۸۹٪ و برای دگرسانی فلیک ۸۵٪ دارای همپوشانی با داده‌های حاصل از روش‌های فرکتالی، سنجش از دور و مدل‌های زمین‌شناسی برای این دو دگرسانی می‌باشد.

کرد، که برای اولین بار در تشخیص بی‌هنجاری‌های طلای رسوبات آبراهه‌ای در منطقه Aroroy در شمال باختر جزیره Masbate واقع در مجمع‌الجزایر فیلیپین به کار برده شد (داداش‌زاده اهری و همکاران، ۱۳۹۳). در این تحقیق، نتایج به دست آمده با توجه به مؤلفه‌های ماتریس Logratio با یکدیگر مقایسه شده و داده‌ای که پس از محاسبات ماتریس Logratio، بیشترین همپوشانی را با داده‌های حاصل از محاسبات سنجش از دور، هندسه فرکتال و مدل‌های زمین‌شناسی داشته باشد، از بیشترین میزان



شکل ۷- شواهد صحرایی مربوط به دگرسانی‌های منطقه در مقایسه با نقشه تلفیق مناطق دگرسانی به دست آمده از روش‌های سنجش از دور.

۵- نوع کانه‌زایی

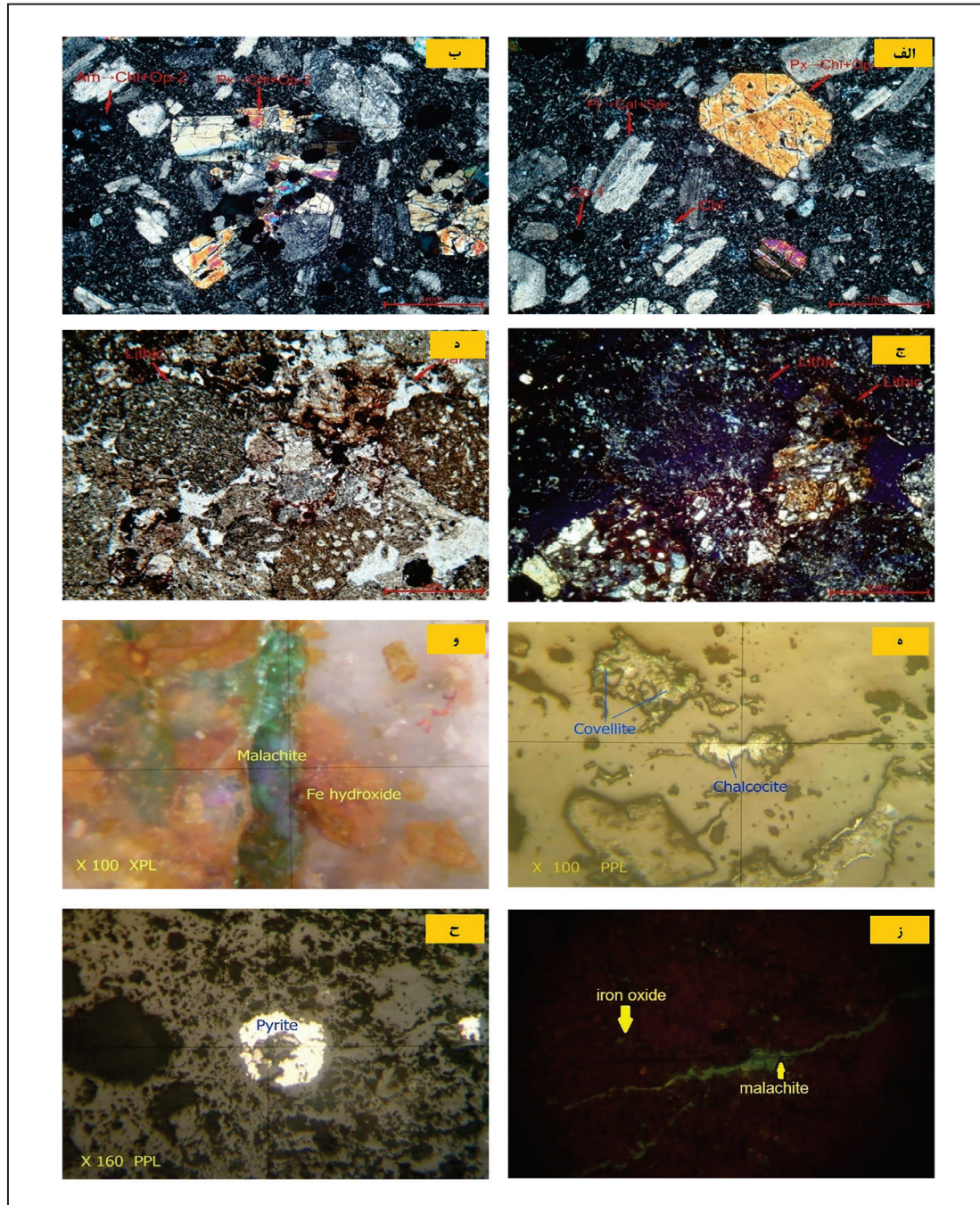
براساس مطالعات کانه‌نگاری صورت گرفته در محدوده تیرکا، کانی‌های اولیه و ثانویه مشخص شد. کانی‌های کالکوسیت، بونیت، دیژنیت، پیریت و کوارتز در مرحله هیپوزن (اولیه) و کانی‌های کوولیت، مالاکیت، آزوریت، همتیت و دیگر اکسیدهای آهن به همراه مقدار کمی از کالکوسیت در مرحله سوپرن (ثانویه) تشکیل شده‌اند. براساس ویژگی‌های محدوده کانه‌دار تیرکا از جمله کانی‌های اولیه و ثانویه موجود، تأثیر سیالات گرمابی در تشکیل رگه‌های ماده معدنی، وجود دایک‌های بازیک، حضور کانی کالکوسیت اولیه به عنوان کانی اصلی، سنگ‌های دربرگیرنده شامل واحدهای سنگی آتشفشانی با ترکیب حدواسط تا بازیک به سن ائوسن میانی- بالایی شامل آندزیت، بازالت، بازالت آندزیتی و ...، محیط زمین‌ساختی فعال و کانه‌زایی در امتداد خطواره‌ها و شکستگی‌ها و وجود دگرسانی‌ها و مقایسه این ویژگی‌ها با ذخایر مس تیب مانتو، کانسار مس تیرکا می‌تواند به عنوان یک ذخیره مس تیب مانتو معرفی شود.

۶- بحث

در این تحقیق، بارزسازی دگرسانی‌های گرمابی منطقه تیرکا با استفاده از تلفیق روش‌های انطباق سیمای طیفی (SFF) و هندسه فرکتال مقدار-تعداد (C-N) صورت گرفت. در مرحله اول، دگرسانی‌های گرمابی توسط داده‌های ماهواره‌ای استر پس از انجام پیش‌پردازش‌های ژئومتری و رادیومتری و پردازش‌های اصلی استخراج شد. از آنجایی که برای تفسیر داده‌های طیفی که در تعیین مناطق دگرسانی گرمابی به کار می‌رود؛ روش‌های پردازش بسیاری وجود دارد؛ در این تحقیق از روش انطباق سیمای طیفی که به نسبت دیگر روش‌های پردازش جدیدتر بوده و دقت بیشتری در شناسایی مناطق دگرسانی دارد، استفاده شد. پردازش داده‌های ماهواره‌ای استر به روش انطباق سیمای طیفی نشان داد که دگرسانی‌های آرژلیک و فلیک در بخش‌های شمالی و جنوب باختری منطقه واقع شده‌اند. دگرسانی اکسید آهن و پروپیلیتیک نیز در بخش‌هایی از شمال باختری و جنوب خاوری منطقه رخ داده است (شکل ۴). مطابقت نقشه زمین‌شناسی محدوده و مناطق دگرسانی مشخص شده نشان داد که اکثر دگرسانی‌ها در واحدهای سنگی آتشفشانی رخ داده است که شامل

برای دگرسانی آرژلیک، پنج جامعه برای دگرسانی پروپلیتیک و چهار جامعه توزیع برای دگرسانی فیلیک تعیین شد. بررسی نمودارهای لگاریتمی رسم شده برای هر یک از دگرسانی‌ها نشان داد که چندین مرحله غنی‌شدگی در منطقه تیرکا وجود داشته است.

آندزیت، تراکی آندزیت و کوارتز تراکی آندزیت می‌باشد. سپس در مرحله دوم، نتایج حاصل از داده‌های سنجش از دور با روش هندسه فرکتال مقدار - تعداد تلفیق شد. نمودارهای لگاریتمی و نقشه‌های جوامع توزیع هر یک از دگرسانی‌ها ترسیم شد (شکل ۵ و ۶). بر این اساس، شش جامعه برای دگرسانی اکسید آهن، چهار جامعه



شکل ۸- الف) نمایی از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز دگرسان‌شده، پیروکسن، کانی اوپاک و کلریت پرکننده فضاهای خالی (وضعیت نوری XPL)؛ ب) نمایی دیگر از فنوکریست پیروکسن و آمفیبول به شدت دگرسان شده (وضعیت نوری XPL)؛ ج) نمایی از قطعات سنگی آندزیتی که به اکسیدهای آهن آغشته شده اند (وضعیت نوری XPL)؛ د) نمایی از قطعات سنگی آندزیتی و کلسیت تشکیل شده در فضای بین آنها (وضعیت نوری PPL)؛ ه) کانی کالکوسیت که در حال تجزیه شدن به کوولیت و مالاکیت است؛ و) مالاکیت و آزوریت به همراه ترکیبات اکسیدهای آهن؛ ز) ترکیبات اکسیدهای آهن (مالاکیت فضای شکستگی‌ها را پر کرده است)؛ ح) کانی پیریت در حال تجزیه به هیدروکسیدهای آهن.

اطلاعات مفید از داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهد. برای دستیابی به بهترین روش‌های پی‌جویی در اکتشاف منابع معدنی، می‌توان از تلفیق روش‌های هندسه فرکتال مقدار تعداد (C-N) و روش انطباق سیمای طیفی (SFF) استفاده کرد. در این تحقیق، با استفاده از تلفیق روش‌های فوق، قسمت‌های مختلف مناطق دگرسانی گرمایی بر اساس شدت تغییرات دگرسانی از هم جدا شدند. در نهایت ترکیبی از روش‌های SFF و روش C-N می‌تواند در پردازش تصاویر ماهواره‌ای به منظور شناسایی و نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد. از مزایای این روش، بی‌دردسر بودن و کاربرد محاسباتی آسان به خوبی امکان محاسبه ارزش عددی غلظت‌ها است که مفیدترین مقدار برای بررسی متقابل اطلاعات همراه با داده‌های عددی از منابع مختلف است که در زمین‌شناسی و سنجش از دور به کار گرفته می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته، ارتباط مثبت و معناداری بین مناطق دگرسانی مشخص شده توسط روش SFF با شدت بالای کانه‌زایی با مناطق دگرسانی که از طریق روش هندسه فرکتال C-N به دست آمد، وجود دارد. همچنین به کارگیری ماتریس Logratio و کسب نتایج دقیق در این تحقیق، نشان از اهمیت این روش به عنوان روشی مناسب به منظور راستی آزمایی نتایج مختلف در مطالعات اکتشافی و زمین‌شناسی دارد. بنابراین، چشم اندازه‌های جدیدی از دگرسانی گرمایی را در قسمت‌های مرکزی، شمالی، جنوب خاوری و جنوب باختری منطقه تیرکا می‌توان تعریف کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله نهایت سپاسگزاری خود را از شرکت پارس آسیا پی جو و آقای مهندس قیس بدخشان ممتاز جهت مساعدت‌های فراوان و در اختیار قراردادن اطلاعات لازم برای نگارش این مقاله ابراز می‌نمایند.

مهم‌ترین و اصلی‌ترین بی‌هنجاری‌ها از مقادیر با ارزش ۲۲۳ برای دگرسانی اکسید آهن، ۲۰۴ برای دگرسانی آرژلیک و ۱۹۹ برای دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک شروع می‌شود. پس از آن، مشاهدات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی نتایج انجام شد. نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات صحرایی صورت گرفته نشان داد که در مناطق مرکزی، شمالی، جنوب خاوری و جنوب باختری منطقه تیرکا بی‌هنجاری‌های بسیار خوبی از دگرسانی‌های گرمایی وجود دارد. همچنین برخی از کانه‌زایی‌ها مانند گوتیت، کلریت، موسکوویت و مونت‌موریلونیت با مناطق دگرسانی اکسید آهن، آرژلیک، پروپیلیتیک و فیلیک ارتباط دارد. پس از آن برای راستی آزمایی نتایج حاصل از روش‌های سنجش از دور، هندسه فرکتال و مشاهدات صحرایی، از ماتریس Logratio استفاده شد که داده‌های به دست آمده همپوشانی بالایی را با داده‌های نامبرده نشان دادند. مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان داد روش انطباق سیمای طیفی از توانایی بالایی در شناسایی کانی‌های دگرسان شده برخوردار است که در تهیه نقشه پراکندگی کانی‌های مذکور بسیار مفید می‌باشد. از طرفی نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش SFF کاملاً مطابق با نتایج پردازش ماهواره‌ای با استفاده از روش هندسه فرکتال C-N است. در مجموع، تلفیق روش‌های سنجش از دور SFF و هندسه فرکتال C-N روش بسیار مفید و مناسبی برای تعیین مناطق دگرسانی گرمایی در اهداف اکتشافی می‌باشد. در نهایت این نتایج برای تشخیص کانه‌زایی و اکتشاف فلزات پایه در محدوده تیرکا ارزشمند خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده ظرفیت بالای روش هندسه فرکتال C-N را برای استخراج

کتابنگاری

- حسینی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۱- تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- داداش‌زاده اهری، ه.، افضل، پ. و رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۹۳- جدایش و دسته‌بندی رگه‌ها از دیدگاه عباری با استفاده از روش فرکتالی عبار- حجم در کانسار طلای قلقله کردستان، نشریه علوم زمین، شماره ۹۴، صفحه ۲۲۴-۲۱۹. GSJ.2015.42918/10.22071.
- عسگری، ج.، علیمحمدی، الف. و نصیری، ی.، ۱۳۹۳- کاربرد سنجش از دور در اکتشاف کانسارها، نخستین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی در آمایش سرزمین.
- هاشمی تنگستانی، م. و رضایی، م.، ۱۳۹۱- بارزسازی کانی‌های دگرسانی کانسار مس پورفریری سونگون با استفاده از روش پردازش انطباق سیمای طیفی (SFF) بر روی داده‌های استر، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

References

- Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Esfandian, B. and Fadakar Alghalandis, Y., 2010- Geochemical Anomaly Separation by Multifractal Modeling in Kahang (Gor Gor) Porphyry System. Central Iran; J. Geochem. Explor. 104 (1-2): 34-46. DOI: 10.1016/j.gexplo.2009.11.003.
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P. and Rashidnejad Omran, N., 2011- Delineation of Mineralization Zones in Porphyry Cu Deposits by Fractal Concentration-Volume Modeling; J. Geochem. Explor. 108(3): 220-232. DOI:10.1016/j.gexplo.2011.03.005.
- Afzal, P., Eskandarnajad Tehrani, M., Ghaderi, M. and Hosseini, M. R., 2016- Delineation of Supergene Enrichment, Hypogene and Oxidation Zones Utilizing Staged Factor Analysis and Fractal Modeling in Takht-e-Gonbad Porphyry Deposit, SE Iran; J. Geochem. Explor. 161: 119-127. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.12.001.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q. and Wright, D. F., 1993- Fractal Modeling of Mineral Deposits; In: Elbrond J, Tang X (Eds). 4th APCOM symposium proceeding, Montreal, Canada, 43-53.
- Agterberg, F. P., 1995- Multifractal Modeling of the Sizes and Grades of Giant and Supergiant Deposits; Int Geol Rev. 37(1): 1-8. DOI:10.1080/00206819509465388.
- Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros Fold-Thrust Belt in Iran; Am. J. Sci. 307(9): 1064-1095. DOI:10.2475/09.2007.02.

- Aramesh Asl, R., Afzal, P., Adib, A. and Yasrebi, A. B., 2015- Application of Multifractal Modeling for the Identification of Alteration Zones and Major Faults Based on ETM+ Multispectral Data; Arab. J. Geosci. 8: 2997-3006. DOI:10.1007/s12517-014-1366-2.
- Azizi, H., Tarverdi, M. A. and Akbarpour, A., 2010- Extraction of Hydrothermal Alterations from ASTER SWIR Data from East Zanjan, Northern Iran; Advances in Space Research. 46(1): 99-109. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.014.
- Barak, S., Bahroudi, A. and Jozanikohan, G., 2018- Exploration of Kahang porphyry copper deposit using advanced integration of geological, remote sensing, geochemical, and magnetics data, Journal of Mining & Environment, (9)1: 19-39. DOI: 10.22044/jme.2017.5419.1357.
- Beiranvandpour, A. and Hashim, M., 2012- The Application of ASTER Remote Sensing Data to Porphyry Copper and Epithermal Gold Deposits; Ore Geology Reviews. 44: 1-9. DOI:10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Beiranvandpour, A., Hashim, M., Hong, K. J. and Park, Y., 2019- Lithological and Alteration Mineral Mapping in Poorly Exposed Lithologies Using Landsat-8 and ASTER Satellite Data: North-Eastern Graham Land, Antarctic Peninsula; Ore Geology Reviews. 108: 112-133. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.07.018.
- Carranza, E. J. M., 2011- Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. Journal of Geochemical Exploration 110(2): 167-185. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007.
- Chen, Z., Chen, J., Tian, S. and Xu, B., 2017- Application of Fractal Content-Gradient Method for Delineating Geochemical Anomalies Associated with Copper Occurrences in the Yangla ore field, China; Geoscience Frontiers. 8(1): 189-197. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.11.010.
- Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994- The Separation of Geochemical Anomalies from Background by Fractal Methods; Journal of Geochemical Exploration. 51(2): 109-130. DOI: 10.1016/0375-6742(94)90013-2.
- Cheng, Q., 2000- Multifractal Theory and Geochemical Element Distribution Pattern; Earth Sci. J. China Univ. Geosci. 25: 311-318. (NSERC -OGP0 183 993).
- Cheng, Q. and Li, Q., 2002- A Fractal Concentration-Area Method for Assigning a Color Palette for Image Representation, Computers and Geosciences. 28(4): 567-575. DOI: 10.1016/S0098-3004(01)00060-7.
- Clark, R. N. and Roush, T. L., 1984- Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications; Journal of Geophysical Research. 89 (B7): 6329-6340. DOI: 10.1029/JB089iB07p06329.
- Clark, R. N., King, T. V. V., Kleijwa, M., Swayze, G. A. and Vergon, N., 1990- High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals; Journal of Geophysical research. 95(B8): 12653-12680. DOI: 10.1029/JB095iB08p12653.
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Gorelick, N. and Kruse, F. A., 1991- Mapping with Imaging Spectrometer Data using the Complete Band Shape Least-Squares Algorithm Simultaneously Fit to Multiple Spectral Features from Multiple Materials; Proc. Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) workshop, Pasadena, California, pp: 2-3.
- Clark, R. N., Swayze, G. A. and Gallagher, A., 1992- Mapping the Mineralogy and Lithology of Canyonlands, Utah with Imaging Spectrometer Data and the Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm; In: Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, p:11-13. DOI: <https://ntrs.nasa.gov/search?q=19940012197&highlight=true>.
- Daneshvar Saein, L., 2017- Delineation of Enriched Zones of Mo, Cu and Re by Concentration-Volume Fractal Model in Nowchun Mo-Cu Porphyry Deposit, SE Iran; Iranian Journal of Earth Sciences. 9(1): 64-72. DOI: http://ijes.mshdiau.ac.ir/article_532517.html.
- Dehaan, R. L. and Taylor, G. R., 2002- Field-Derived Spectra of Salinized Soils and Vegetation as Indicators of Irrigation-induced Soil Salinization; Remote Sensing of Environment. 80(3): 406-417. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00321-2.
- Eshraghi, S. A. and Jalali, A., 2006- Geological Map of Moaleman, 1:100,000; Geology Survey; Tehran, Iran.
- Farahmandfar, Z., Jafari, M.R., Afzal, P. and Ashja.Ardalan, A., 2020- Description of Gold and Copper Anomalies using Fractal and Stepwise Factor Analysis According to Stream Sediments in Lahrud 1:100,000 Sheet, NW Iran; Geopersia 10(1): 135-148. DOI:10.22059/GEOPE.2019.265535.648413.
- Fard, M., Rastad, E. and Ghaderi, M., 2006- Epithermal Gold and Base-Metal Mineralization at Gandy Deposit, North of Central Iran and the Role of Rhyolitic Intrusions; J. Sci. Islamic Repub of Iran, 17(4): 327-335. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=52238>.
- Feyzollahi, N., Torshizian, H., Afzal, P. and Jafari, M. R., 2018- Determination of Lithium Prospects using Fractal Modeling and Staged Factor Analysis in Torud Region, NE Iran; Journal of Geochemical Exploration. 189: 2-10. DOI:10.1016/j.gexplo.2017.09.017.
- Ghorbani, M. and Ovissi, M., 2016- Metallogeny of Toroud- Chahshirin Mountains and various mineralization types, 35th INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS.
- Hassanpour, S. and Afzal, P., 2013- Application of Concentration-Number (C-N) Multifractal Modeling for Geochemical Anomaly Separation in HaftCheshmeh Porphyry System, NW Iran; Arab. J. Geosci. 6: 957-970. DOI: 10.1007/s12517-011-0396-2.
- Hunt, G. R. and Ashley, P., 1979- Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared; Economic Geology. 74(7): 1613-1629. DOI: 10.2113/gsecongeo.74.7.1613.

- Karami, K. and Afzal, P., 2015- Application of Multifractal Modeling for Separation of Sulfidic Mineralized Zones Based on Induced Polarization and Resistivity Data in the GhareTappeh Cu Deposit, NW Iran; *Iranian Journal of Earth Sciences*. 7(2): 134-141. http://ijes.mshdiau.ac.ir/article_524031.html.
- Khalili, H. and Afzal, P., 2018- Application of spectrum-volume fractal modeling for detection of mineralized zones.; *Journal of Mining and Environment*. 9: 371-378. DOI: 10.22044/JME.2018.6285.1451.
- Li, C. J., Ma, T. H. and Shi, J. F., 2003- Application of a Fractal Method Relating Concentration and Distances for Separation of Geochemical Anomalies from Background; *J Geochem Explor*. 77(2-3): 167-175. DOI: 10.1016/S0375-6742(02)00276-5.
- Mandelbrot, B. B., 1983- *The Fractal Geometry of Nature*; Freeman, San Francisco. pp: 1-468.
- Mars, J. C. and Rowan, L. C., 2006- Regional Mapping of Phyllic and Argillic Altered Rocks in the Zagros Magmatic Arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data and Logical Operator Algorithms; *Geosphere*. 2(3): 161-186. DOI: 10.1130/GES00044.1.
- Nazarpour, A., 2018- Application of C-A Fractal Model and Exploratory Data Analysis (EDA) to Delineate Geochemical Anomalies in the Takab 1:25,000 Geochemical Sheet, NW Iran; *Iranian Journal of Earth Sciences*. 10(2): 173-180. http://ijes.mshdiau.ac.ir/article_543032.html.
- Ninomiya, Y. and Fu, B., 2019- Thermal Infrared Multispectral Remote Sensing of Lithology and Mineralogy Based on Spectral Properties of Materials; *Ore Geology Reviews*. 108: 54-72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
- Noori, L., Beiranvandpour, A., Askari, GH., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, CH.Wand and Honarmand, M., 2019- Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran, *Journal of Remote Sensing*. (11)5: 495. DOI: 10.3390/rs11050495.
- Oskouei, M. and Busch, W., 2012- A Selective Combined Classification Algorithm for Mapping Alterations on ASTER Data; *Appl. Geomat*. 4: 47-54. DOI: 10.1007/s12518-012-0077-1.
- Ostadosseini, A., Barati, M., Afzal, P. and Lee, I., 2018- Polymetallic Mineralization Prospecting using Fractal and Staged Factor Analysis in Ardestan Area, Central of Iran; *Geopersia*. 8(2): 279-292. DOI: 10.22059/GEOPE.2018.254848.648376.
- Othman, A. A. and Gloaguen, R., 2017- Integration of Spectral, Spatial and Morphometric Data into Lithological Mapping: A Comparison of Different Machine Learning Algorithms in the Kurdistan Region, NE Iraq; *Journal of Asian Earth Sciences*. 146: 90-102. DOI: 10.1016/j.jseae.2017.05.005.
- Poormirzaee, R. and Mohammady Oskouei, M., 2010- Use of Spectral Analysis for Detection of Alterations in ETM Data, Yazd, Iran; *Applied Geomatics*. 2: 147-154. DOI: 10.1007/s12518-010-0027-8.
- Porwal, A. and González-Álvarez, I., 2019- Introduction to Special Issue on Geologic Remote Sensing; *Ore Geol. Rev*. 105: 216-222. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.12.001.
- Rajendran, S. and Nasir, S., 2017- Characterization of ASTER Spectral Bands for Mapping of Alteration Zones of Volcanogenic Massive Sulphide Deposits; *Ore Geology Reviews*. 88: 317-335. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.04.016.
- Rastad, E., Tajeddin, H., RashidnejadOmran, N. and Babakhani, A., 2000- Genesis and Gold (Copper) Potential in DarestanBaghou Mining Area. Iran; *Geosci.J*. 9(35-36): 60-79. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=47535>.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A. B. and Saein, L. D., 2012- Application of Fractal Models to Outline Mineralized Zones in the Zaghia Iron Ore Deposit, Central Iran; *J Geochem Explor*. 122: 9-19. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.04.011.
- Shamianian, G. H., Hedenquist, J. W., Hattori, K. H. and Hassanzadeh, J., 2004- The Gandy and Abolhassani Epithermal Deposits in the Alborz Magmatic Arc, Semnan Province, Northern Iran; *Econ. Geol*. 99(4): 691-712. DOI: 10.2113/gsecongeo.99.4.691.
- Turcotte, D. L., 1986- A Fractal Approach to the Relationship Between Ore Grade and Tonnage; *Econo Geol*. 81(6): 1528-1532. DOI: 10.2113/gsecongeo.81.6.1528.
- Yasrebi, A. B. and Hezarkhani, A., 2019- Resources Classification using Fractal Modelling in Eastern Kahang Cu-Mo Porphyry Deposit, Central Iran; *Iran J Earth Sci*. 11(1): 56-67. http://ijes.mshdiau.ac.ir/article_544596_116043.html.
- Zamyad, M., Afzal, P., PourKermani, M., Nouri, R. and Jafari, M. R., 2018- Geochemical Anomaly Separation by Fractal Modeling in Moaleman 1:100,000 Sheet, NE Iran; TRIGGER International Conference, School of Geology, University of Tehran, Iran.
- Zamyad, M., Afzal, P., PourKermani, M., Nouri, R. and Jafari, M. R., 2019- Determination of Hydrothermal Alteration Zones Using Remote Sensing Methods in Tirka Area, Toroud, NE Iran; *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 47: 1817–1830. DOI: 10.1007/s12524-019-01032-3.

Original Research Paper

Combination of Spectral Feature Fitting (SFF) and Concentration-Number (C-N) Fractal Modeling for Identification Alteration in Tirka Area, NE Iran

Mina Zamyad¹, Peyman Afzal^{2*}, Mohsen Pourkermani¹, Reza Nouri³ and Mohammad Reza Jafari¹¹ Ph.D. Student, Department of Geology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran² Associate Professor, Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran³ Professor, Department of Geology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran⁴ Ph.D., Department of Mining, Omran Moomun Chabahar Co., Tehran, Iran⁵ Assistant Professor, Department of Geology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2020 October 13

Accepted: 2021 March 28

Available online: 2021 December 22

Keywords:

Fractal modeling

SFF

Hydrothermal alteration

Tirka

ABSTRACT

Tirka area is situated in NE Iran as a part of the TCMB which consists of Paleogene sediments and volcanic rock units with a combination of Eocene intermediate to basic rocks. The research aim is to determine the alteration zones using C-N fractal model based on ASTER satellite images. First, the ASTER data was processed using SFF method for determination of iron oxide, propylitic, phyllic, and argillic alteration zones. The C-N fractal model is utilized for the separation of different parts of alteration zones. The results derived via the C-N fractal model showed that the main trend of the alteration zones is in NE-SW direction. Also, based on the C-N log-log plots, there are six geochemical populations for iron oxide alteration, four geochemical populations for argillic and phyllic alterations, and five geochemical populations for propylitic alteration. There is a high intensity of alteration zones commences with 223 for iron oxide, 204 for argillic, 199 for propylitic and phyllic alteration zones. In order to validate the results, field observations and petrographical and mineralogical studies based on thin-polish sections were carried out. These data confirmed the alteration zones obtained by the modeling. Also, using the Logratio matrix, the data obtained from the combination of remote sensing methods, fractal geometry and geological models were evaluated and verified.

* Corresponding author: Peyman Afzal; E-mail: p_afzal@azad.ac.ir

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2021.242384.1827 dor: 20.1001.1.10237429.1400.31.4.3.2