

پردازش داده‌های ماهواره‌ای، دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی در محدوده اکتشافی مهرخش، شمال غرب بیرجند

مریم جاویدی مقدم^{۱*}، محمدحسن کریم‌پور^۲، آزاده ملک‌زاده سفارودی^۳، محمدرضا حیدریان شهری^۴

۱- دانشجوی دکترای زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد زمین‌شناسی اقتصادی و اکتشافات ژئوشیمیایی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار اکتشافات ژئوفیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۶/۱۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۳/۱۰

چکیده

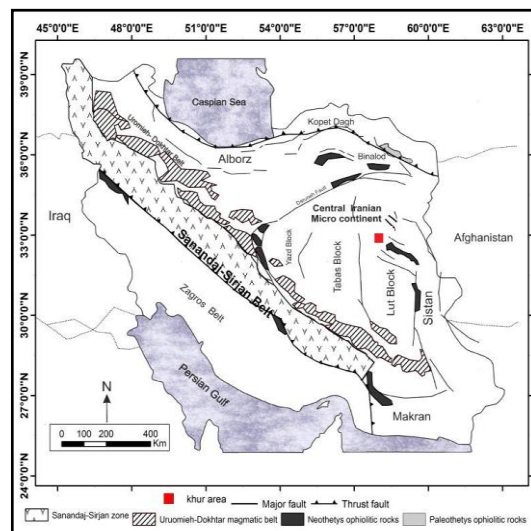
منطقه مهرخش در شرق ایران و در ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند واقع شده است. این محدوده شامل برنزدهایی از ولکانیک‌های پالئوسن-اؤسن بوده که توده نیم‌عمیق کوارتز دیوریتی در آن‌ها نفوذ نموده است. پی‌جویی اولیه در این منطقه به کمک پردازش داده‌های ماهواره‌ای آستر به روش نقشه‌بردار زاویه طیفی دگرسانی‌های پروپلیتیک، آرژیلیک و سرسیتیک را بارز کرد که با مشاهدات صحرایی تایید شدند. دگرسانی‌های اصلی منطقه شامل پروپلیتیک، آرژیلیک و سیلیسی-کربناته می‌باشند. کانی‌سازی به اشکال رگه‌ای (شمال، مرکز و غرب منطقه) و پراکنده (شمال منطقه) دیده می‌شود. رگه‌ها دارای امتداد شمال غرب- جنوب شرق تا شمالی-جنوبی و شیب ۸۵ تا ۹۰ درجه می‌باشند. رگه‌ها بیشتر سیلیسی-سولفیدی هستند و کانی‌های سولفیدی در سطح شدیداً اکسید شده و مالاکیت، آزوریت، کالکوزیت، کولیت، هماتیت و گوتیت تشکیل شده‌اند. کانی اولیه سولفیدی در منطقه دیده نشد. کانی‌های باطله کلسیت، کوارتز و باریت می‌باشد. حداکثر مقدار پراکندگی مس، روی و سرب در رسوبات آبراهه‌ای در مناطقی است که در بالادست آن کانی‌سازی رگه‌ای وجود دارد و در ارتباط با دگرسانی‌های آرژیلیک-کربناته-پروپلیتیک می‌باشد. محدوده تغییرات عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی بر مبنای سنگ در رگه‌ها به صورت زیر است: مس ۴۳۵۰۰-۱۳۰ گرم در تن، روی ۱۷۰-۱۳ گرم در تن، سرب ۳۹۹-۱۸ گرم در تن، طلا تا ۵۰ میلی‌گرم در تن و نقره ۲۷/۳-۰/۲ گرم در تن. بیشترین میزان عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی بر مبنای سنگ در محل کانی‌سازی پراکنده در واحدهای لیتیک توف و آندزیتی است. انطباق خوبی بین نتایج پردازش‌های ماهواره‌ای آستر با دگرسانی، کانی‌سازی و بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد. با توجه به گسترش دگرسانی‌ها، ژئوشیمی، نوع کانی‌سازی عمدتاً رگه‌ای و همچنین ارتباط آنها با سیستم شکستگی‌ها می‌توان کانسار مهرخش را در رده کانسارهای اپی‌ترمال قرار داد.

واژه های کلیدی: بلوک لوت، دگرسانی، ژئوشیمی، کانی‌سازی رگه‌ای، مهرخش.

مقدمه

شامل ریفتی‌شدن، تشکیل اقیانوس کوچک بین بلوک لوت و افغان، فرورانش پوسته اقیانوسی، بسته‌شدن اقیانوس و برخورد لوت و افغان را مطرح کرده‌اند (افتخارنژاد، ۱۳۵۲؛ تیرو و دیگران، ۱۹۸۳؛ بربریان و همکاران، ۱۹۹۹) کانسارهای شرق ایران را وابسته به آنها می‌دانند. برخی دیگر نیز مسئله فرورانش را رد کرده و تشکیل کانی‌سازی را به وجود شرایط کششی نسبت داده‌اند (سامانی و اشتری، ۱۳۷۱؛ ترکیان و همکاران، ۱۹۸۳). فاصله زمانی بین ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (اوسن میانی تا اوایل الیگوسن)، مهمترین پنجره زمانی کانی‌سازی در شرق ایران و بلوک لوت، بویژه محدوده استان خراسان جنوبی است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). انواع کانی‌سازی مس - طلا پورفیری، طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی، طلای اپی‌ترمال سولفید بالا، اسکارن آهن، رگه‌های Pb-Zn-Sb و IOCG شناسایی شده‌اند. لذا گرانیوتئیدهای تشکیل شده در محدوده زمانی ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال که در بلوک لوت و شمال آن قرار دارند، برای این مجموعه کانی‌سازی پتانسیل دارند (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

منطقه اکتشافی مهرخش در شرق ایران و در گستره‌ای بین طول‌های "۵۸°۲۰'۱۵" تا "۴۴°۲۲'۵۸" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۳°۶'۳۳" تا "۳۳°۹'۱۴" شمالی و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این منطقه از نظر تقسیمات ساختمانی در شمال بلوک لوت واقع شده است (شکل ۱) (روت و اشتوکلین، ۱۹۶۷؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ علوی، ۱۹۹۱). مهم‌ترین ویژگی لوت که آن را از دیگر بخش‌های خرد قاره ایران مرکزی جدا می‌کند، وجود حجم عظیم ماگماتیسم ترشیاری، به ویژه سنگ‌های آتشفشانی است که با داشتن ضخامتی در حدود ۲۰۰۰ متر بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشاند. وجود فعالیت‌های ماگمایی گسترده با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت در نقاط مختلف، باعث شده تا بلوک لوت پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌های فلزی و غیر فلزی داشته باشد (امامی، ۱۳۷۹؛ کمپ و گریفیس، ۱۹۸۲؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۶). نظریات زمین‌ساختی مختلفی در مورد چگونگی شکل‌گیری بلوک لوت وجود دارد. بیشتر آنها وجود یک چرخه کامل کوهزایی



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در بلوک لوت (روت و اشتوکلین، ۱۹۶۷؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ علوی، ۱۹۹۱).

۱۰ بلوک صیقلی به منظور بررسی‌های سنگ-شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی. پ) تهیه نقشه زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی رقومی منطقه با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ (ت) مطالعه و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای و مطالعات ژئوشیمیایی بر مبنای نمونه‌های خرده‌سنگی حاصل از برداشت‌های سازمان صنایع و معادن خراسان جنوبی به روش ICP MS که در آزمایشگاه ALS-CHEMX کشور کانادا انجام شده است (جمیع، ۱۳۸۷).

نتایج

زمین‌شناسی

محدوده اکتشافی مهرخش از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای در گوشه جنوب شرقی بر گره ۱:۱۰۰۰۰۰ سارغنج قرار گرفته است (لطفی، ۱۹۹۵). بر طبق این نقشه، بخش اعظم منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری است. با تاکید بر روی محدوده اصلی کانی‌سازی و دگرسانی نقشه زمین-شناسی منطقه با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شد (شکل ۲). براساس مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی انجام شده، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در گستره پی‌جویی مهرخش را می‌توان به ۳ بخش تقسیم کرد: ۱- سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری پالئوسن-ائوسن ۲- توده نیمه عمیق هورنبلند بیوتیت کوارتز دیوریت پورفیری ۳- تراسه‌های آبرفتی متعدد، رسوبات مخروط افکنه‌ای، دشت سیلابی و رسوبات رودخانه‌های عهدحاضر.

واحدهای آتشفشانی منطقه شامل هورنبلند آندزیت، بیوتیت هورنبلند آندزیت، هورنبلند پیروکسن آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت می-باشد (شکل ۲). این واحدها عمدتاً در شرق، جنوب‌غرب و شمال منطقه رخنمون دارند. واحد

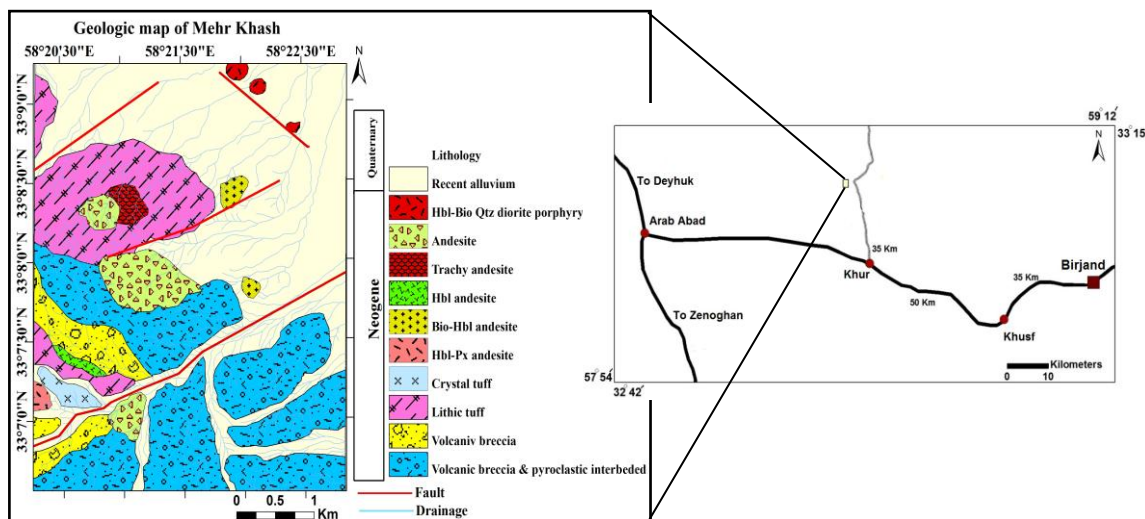
محدوده مهرخش در ۲۵ کیلومتری شمال روستای خور قرار گرفته است. شمال خور به دلیل حجم عظیم سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری، حضور کانی‌سازی‌های رگه‌ای نوع سرب، روی و مس (شورک) و مس (شکسته‌سبز، حوض‌دغ، مهرخش، رشیدی و غار کفتری)، وجود حفاری‌های قدیمی و سرباره‌های فراوان، سیستم شکستگی‌ها و نفوذ دایک‌های متعدد حائز اهمیت است. ملک‌زاده و کریم‌پور (ملک‌زاده سفارودی و کریم‌پور، ۲۰۰۳)، با انجام پردازش‌های ماهواره‌ای به روش SAM در محدوده شمال‌خور، این منطقه را برای کانی‌سازی مس پورفیری و اپی‌ترمال‌های مرتبط مناسب معرفی کرده‌اند. تا کنون پروژه‌های اکتشاف مقدماتی، نیمه تفصیلی و تفصیلی مواد معدنی در شهرستان سرایان مربوط به سازمان صنایع و معادن خراسان جنوبی، توسط شرکت پارس کانی و شرکت ایتوک انجام شده است که منطقه مهرخش نیز قسمتی از این پروژه اکتشافی بوده است (جمیع، ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷). شرکت ایتوک اطلاعاتی درباره زمین‌شناسی و ژئوشیمی منطقه ارائه نموده است (جمیع، ۱۳۸۷). هدف از این کار پژوهشی، تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه با تاکید ویژه بر شناسایی و تفکیک توده‌های نفوذی از سنگ‌های آتشفشانی، مطالعات دورسنجی، بررسی دگرسانی‌ها و منطقه‌بندی آنها، بررسی انواع مختلف کانی‌سازی و ویژگی‌های آنها و انطباق آنها با داده‌های ژئوشیمیایی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الف) پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER به‌منظور تفکیک زون‌های دگرسانی و شدت و پراکندگی آنها به کمک نرم‌افزار ENVI 4.2 به روش نقشه‌بردار زاویه طیفی. ب) تهیه و مطالعه بیش از ۸۰ مقطع نازک، ۱۵ مقطع نازک صیقلی و

اپیدوت و کانی‌های رسی دگرسان شده و بلورهای هورنبلند نیز به کلریت و مگنتیت تبدیل شده‌اند که در برخی قسمت‌ها این تبدیل‌شدگی به صورت کامل بوده است. در نمونه‌های برداشت شده از منطقه نیز حفرات موجود در این واحدها توسط ژئولیت پر شده است.

آندزیتی نسبت به دیگر سنگ‌های آتشفشانی گسترش بیشتری داشته است. بافت این واحدها پورفیری، گلوپورفیری تا تراکیتی با زمینه میکروکریستالین تا شیشه است. فنوکریست‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت می‌باشد. پلاژیوکلازها در بعضی نقاط به



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مهرخش.

موجود اغلب ترکیب آندزیتی داشته و ۲ تا ۳ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. آغشتگی به اکسیدهای آهن در این واحد نیز دیده می‌شود. برش ولکانیکی: این واحد شامل یک سری از قطعات سنگ‌های ولکانیکی با زمینه‌ای با ترکیب داسیتی است و در جنوب‌غرب و غرب منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). قطعات سنگی آنها در حد پیروکسن آندزیت، آندزیت، تراکی آندزیت و لاتیت هستند. پلاژیوکلازهای موجود در قطعات سنگی، به شدت دگرسان شده و اغلب به رس و کمتر به سریسیت تبدیل شده‌اند. حفرات پر شده در این واحد اغلب توسط کوارتز ریز بلور پر شده و بافت اسفرولیتی را ایجاد کرده است. رگه -رگچه- های سیلیسی و سلیسی-کربناتی در زمینه این واحد مشاهده می‌شوند.

واحدهای آذرآواری شامل لیتیک توف، کریستال توف، برش ولکانیکی و برش‌های ولکانیکی و آذرآواری‌های بین لایه‌ای می‌باشد. لیتیک توف در قسمت شمال، شمال‌غرب و جنوب محدوده مورد مطالعه رخنمون دارد (شکل ۲). واحد لیتیک توف به همراه واحدهای آندزیتی، سنگ میزبان کانی‌سازی‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشند. قطعات سنگی در حد آندزیت، تراکی آندزیت و داسیت می‌باشند. ژئولیت‌ها به شکل ثانویه فضای بین درز و شکستگی‌ها را پر کرده است و زمینه سنگ علاوه بر قطعات تشکیل‌دهنده آن دارای آغشتگی به اکسیدهای آهن می‌باشد. کریستال توف در قسمت‌های جنوبی منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد عمدتاً حاوی بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند، سانیدین و به میزان کمتر پیروکسن می‌باشد. لیتیک‌های

پردازش تصاویر در اکتشاف تیپ‌های مختلف کانساری سوق می‌دهد (پرز و همکاران، ۲۰۰۰؛ معصومی و رنجبر، ۱۳۸۷). در این مطالعه از داده‌های سنجنده ASTER با شماره ۳۳۱-۲۰۰۱-b۰۳۰۸۰۱ که در تاریخ ۱۸/۰۶/۲۰۰۱ تصویر برداری شده، استفاده شد. به منظور تفکیک دگرسانی از روش نقشه بردار زاویه طیفی (Spectral Angel Mapper) استفاده شده است. این روش نوعی طبقه‌بندی هدایت (Supervised Classification) شده است که از مقایسه طیف تصاویر و طیف استاندارد یا کتابخانه طیفی استفاده می‌کند (کروس و همکاران، ۱۹۹۳؛ راهنمای ENVI User، ۲۰۰۳؛ ژونگای و همکاران، ۲۰۱۰).

روش SAM برای کانی‌های دیکیت، ایلیت، کائولینیت، پیروفیلیت، مونتموریونیت، لیمونیت، ژاروسیت، گوتیت، کلریت، زوئیزیت و اپیدوت اجرا گردید و زاویه بهینه برای هر کانی با توجه به مشاهدات صحرایی بدست آمد (جدول ۱). شدت و گسترش پراکندگی این کانی‌ها منجر به شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های مختلف شده است (شکل های ۳، ۴ و ۵). مقایسه کانی‌های کائولینیت، مونتموریونیت، پیروفیلیت، سرسیت بدست آمده از پردازش تصاویر آستر به عنوان شاخص زون آرژیلیک نشان می‌دهد که بیشتر در قسمت‌های شمال و مرکز و به مقدار کمتر در غرب منطقه گسترش یافته است (شکل ۳).

- برش‌های ولکانیکی و آذرآواری‌های بین لایه‌ای: قسمت جنوب و مرکز نقشه را پوشانده است که شامل واحد برش‌های ولکانیکی و واحد آذرآواری است و به صورت بین لایه‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۲). واحد آذرآواری شامل قطعات کمی گردشده تا گرد شده آندزیتی می‌باشد که به‌وسیله خاکسترهای آندزیتی به هم جوش خورده‌اند. مواد تشکیل‌دهنده آن به لحاظ اندازه متفاوت بوده و از ذرات ریز تا قطعات سنگی بزرگ تشکیل شده است.

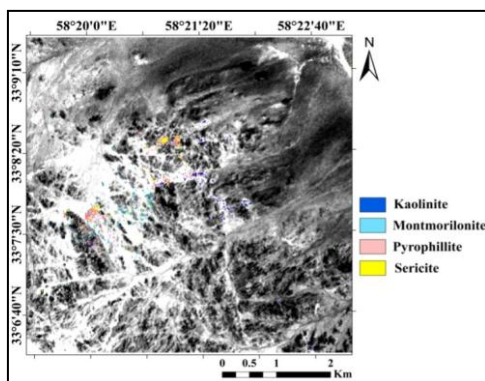
- هورنبلند بیوتیت کوارتز دیوریت پورفیری در شمال شرق منطقه با گسترش خیلی کم رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد بافت پورفیری دارد و فنوکریست‌های آن از پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده‌اند. زمینه سنگ نیز شامل کانی‌های فنوکریست و همچنین کوارتز (۲ تا ۳ درصد) می‌باشد. کانی‌های بیوتیت و هورنبلند تبدیل به کلریت و کانی‌های کدر شده‌اند. رگچه‌های کربنات، کانی‌های کدر و اکسیدهای آهن در این واحد دیده می‌شود.

مطالعات دورسنجی

مطالعات دورسنجی و به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای برای بارزسازی زون‌های دگرسانی، در دهه‌های اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است. پیشرفت‌های حاصل شده در آنالیز و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای به همراه سرعت بالا، کارایی و ارزان بودن این روش‌ها، متخصصان اکتشاف ذخایر را در جهت کاربرد روز افزون و توسعه تکنیک‌های

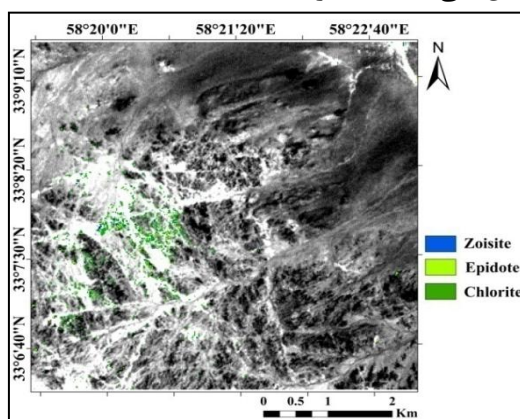
جدول ۱: زاویه طیفی بهینه برای کانی‌های موجود در منطقه که در مشاهدات صحرایی مشاهده شده است.

کانی‌های دگرسانی	Kaolinite	Montmorilonite	Illite	Pyrophyllite	Dikite
زاویه طیفی بهینه	0.27	0.22	0.342	0.21	0.351
Chlorite	Epidote	Zoisite	Jarosite	Gypsum	Limonite
0.28	0.27	0.086	0.28	0.342	0.62



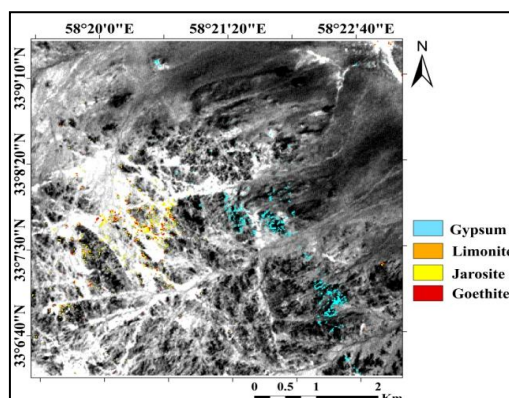
شکل ۳: تصاویر ماهواره‌ای آستر، که دگرسانی آرژلیک بر روی آن بارسازی شده است.

مقایسه کانی‌های کلریت، اپیدوت و زوئیزیت
 بدست آمده از پردازش تصاویر آستر به عنوان
 بخش مرکزی تا جنوب غرب تصویر گسترش
 بیشتری یافته است (شکل ۴).
 شاخص زون پروپلیتیک، نشان می‌دهد که در



شکل ۴: تصاویر ماهواره‌ای آستر، که دگرسانی پروپلیتیک بر روی آن بارسازی شده است.

زون پروپلیتیک نسبت به زون آرژلیک گسترش کمتری را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه کانی‌های گوتیت، ژیپس، ژاروسیت و لیمونیت به عنوان کانی‌های ثانویه نماینده زون گوسان نشان داد که کانی‌های گوتیت، همتیت، لیمونیت و ژاروسیت عمدتاً در غرب محدوده گسترش داشته‌است (شکل ۵). حضور این دگرسانی‌ها با مشاهدات دقیق صحرایی نیز به اثبات رسیده‌اند. نتایج حاصل از پردازش‌های ماهواره‌ای نقش مهمی در پیدا کردن محل کانی‌سازی‌های رگه‌ای در منطقه داشت.

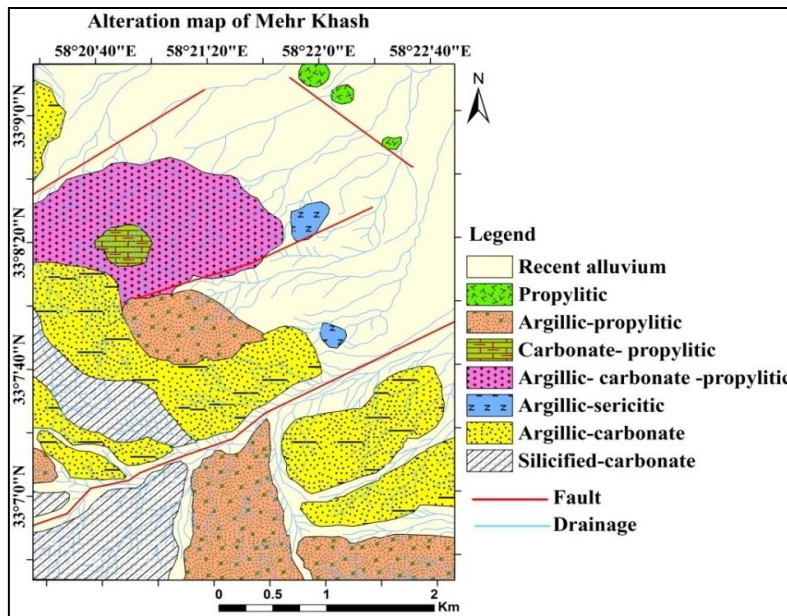


شکل ۵: تصاویر ماهواره‌ای آستر، کانی‌های لیمونیت، ژیپس، گوتیت و ژاروسیت بر روی آن بارسازی شده است.

دگرسانی

براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی ۳ نوع دگرسانی اصلی در سطح شناسایی شده است که عبارتند از: ۱- پروپلیتیک ۲- آرژیلیک ۳- کربناته. این ۳ نوع دگرسانی براساس فراوانی کانی‌های حاصل از دگرسانی به ۷ زیر زون تفکیک شده‌اند. که عبارتند از: ۱- زون پروپلیتیک- آرژیلیک ۲-

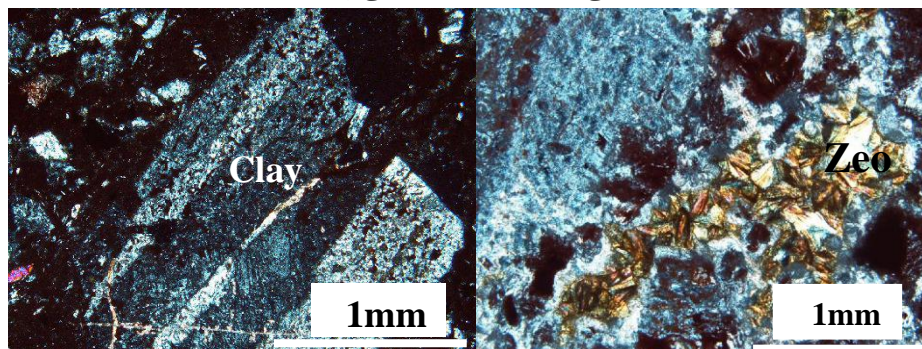
زون آرژیلیک- پروپلیتیک ۳- زون کربناته- پروپلیتیک- آرژیلیک ۴- زون آرژیلیک - کربناته- پروپلیتیک ۵- زون آرژیلیک- سرسیت ۶- زون آرژیلیک- کربناته ۷- سیلیسی- کربناتی (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه دگرسانی منطقه مهرخش.

هورنبلندها در مرکز کلریتی و از حاشیه با کانی-های کدر تبدیل شده‌اند. پلاژیوکلازها نیز به کانی-های رسی (۲ تا ۳ درصد) دگرسان شده‌اند. حفرات سنگ اغلب زئولیت (۳ تا ۵ درصد) پر شده است (شکل ۷-الف). همچنین برخی از زئولیت‌ها حفرات اطراف پلاژیوکلازها را به شکل جالبی پر کرده‌اند.

- دگرسانی پروپلیتیک در شمال شرق منطقه گسترش داشته و واحد هورنبلند بیوتیت کوارتز دیوریت پورفیری را تحت تاثیر قرار داده است (شکل ۶). مهمترین کانی‌های این دگرسانی کلریت، اپیدوت و به مقدار کم کانی‌های رسی و سرسیت می‌باشد. مقدار اپیدوت از ۵ تا ۱۰ درصد و کلریت از ۱۰ تا ۳۰ درصد متغیر می‌باشد.



شکل ۷: الف) حفرات پر شده با زئولیت در نور XPL (ب) تبدیل پلاژیوکلاز به کانی رسی در نور XPL

- دگرسانی کربناته- پروپلیتیک گسترش کمی در شمال منطقه داشته و واحد تراکی آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است (شکل ۶). پلاژیوکلازهای موجود در قطعات سنگی، دگرسان شده و اغلب به اپیدوت (۵ تا ۷ درصد) و به‌طور بخشی به کربنات (۳ تا ۵ درصد) دگرسان شده‌اند. اغلب کانی‌های فرومنیزین کلریتی (۵ تا ۱۰ درصد) شده‌اند. همچنین این واحد حاوی رگچه‌های کلسیتی می‌باشد. زمینه سنگ نیز به شدت کربناته شده است.

لایه‌ای، کریستال توف، لیتیک توف و هورنبلند آندزیت را تحت تاثیر قرار داده‌است. پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی (۱۲ تا ۱۵ درصد) و کلسیت (۳ تا ۵ درصد) تبدیل شده‌اند. همچنین این واحد حاوی رگچه‌های کلسیتی می‌باشد. زمینه سنگ نیز به شدت کربناته شده‌است.

- دگرسانی سیلیسی- کربناته واحد برش ولکانیکی را تحت تاثیر قرار داده‌است. عمدتاً در قسمت‌های جنوب-شرق و تا حدودی مرکز و غرب منطقه رخنمون داشته و گسترش نسبتاً زیادی در منطقه دارد (شکل ۶). زمینه سنگ نیز سیلیسی (۳ تا ۷ درصد) شده‌است. کلسیت گاه تا بیش از ۸ درصد در این زون دیده می‌شود. سرسیت همراه با کانی‌های اپیک از دیگر کانی‌های این دگرسانی می‌باشند. سیلیس به صورت رگه- رگچه‌ای و پرکننده حفره‌ها مشاهده می‌شود که بافت اسفرولیتی را ایجاد کرده است.

کانی‌سازی

در منطقه مهرخش، کانی‌سازی‌ها عمدتاً به شکل رگه‌ای و به میزان کمتر به صورت پراکنده دیده می‌شود. کانی‌های ثانویه شامل هماتیت، گوتیت، ملاکیت، آزوریت و به میزان خیلی کم کالکوسیت

- دگرسانی آرژیلیک- پروپلیتیک گسترش نسبتاً زیادی در مرکز و جنوب منطقه دارد. واحدهای برش ولکانیکی و آذرآواری‌های بین لایه‌ای، آندزیت و هورنبلند پیروکسن آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است (شکل ۶). پلاژیوکلازهای موجود در قطعات سنگی، دگرسان شده و اغلب به رس (۱۰ تا ۱۵ درصد) تبدیل شده‌اند (شکل ۷-ب). همچنین به‌طور بخشی به اپیدوت (۳ تا ۵ درصد) و کربنات (۲ تا ۵ درصد) دگرسان شده و اغلب کانی‌های فرومنیزین کلریتی شده‌اند.

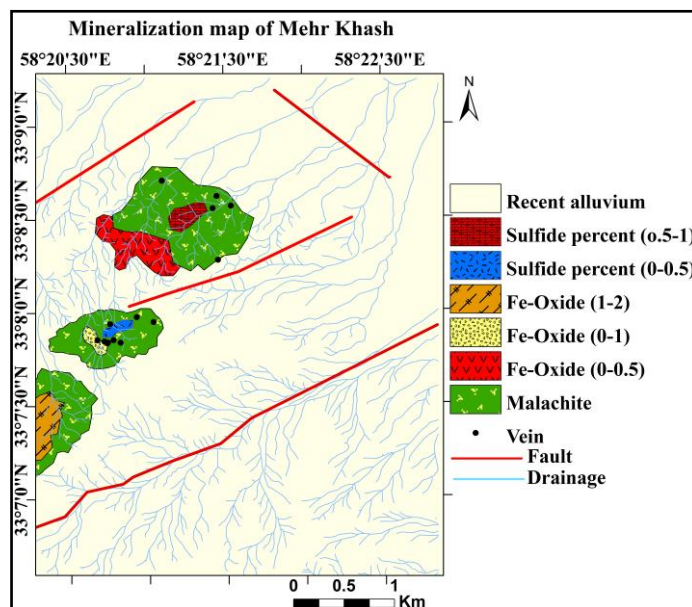
- دگرسانی آرژیلیک-کربناته- پروپلیتیک گسترش نسبتاً زیادی در شمال منطقه داشته و واحد لیتیک توف را تحت تاثیر قرار داده‌است (شکل ۶). در پلاژیوکلازها علاوه بر تبدیل شدن آنها به کانی‌های رسی (۱۰ تا ۱۵ درصد)، تبدیل شدگی آنها را به کلسیت (۵ تا ۷ درصد) را شاهد هستیم. هورنبلندها تا حدودی کلریتی شده‌اند (۳ تا ۷ درصد). همچنین در بعضی قسمت‌ها پلاژیوکلازها در امتداد ماکل به اپیدوت تبدیل شده‌اند (شکل ۶). حفرات سنگ اغلب با کلسیت و زئولیت (۲ تا ۳ درصد) پر شده‌است. بخشی از زئولیت‌هایی که حفرات سنگی را پر کرده‌اند، به رنگ قهوه‌ای روشن دیده می‌شوند که ناشی از آغستگی زمینه سنگ به اکسیدهای آهن است.

- دگرسانی آرژیلیکی- سرسیتی: گسترش خیلی کم در شرق منطقه داشته و واحد بیوتیت هورنبلند آندزیت را تحت تاثیر قرار داده‌است (شکل ۶). پلاژیوکلازهای موجود در قطعات سنگی، به شدت دگرسان شده و اغلب به رس (۱۲ تا ۱۵ درصد) و کمتر به سرسیت (۵ تا ۷ درصد) تبدیل شده‌اند.

- دگرسانی آرژیلیک- کربناته گسترش زیادی در قسمت‌های شرق، مرکز و غرب دارد (شکل ۶). واحدهای برش ولکانیکی و آذرآواری‌های بین

از چند سانتیمتر تا یک متر متغیر است. تمامی این رگه‌ها در امتداد زونهای گسلی و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. رگه‌ها شامل: ۱- رگه‌های کوارتز کریپتوکریستالین - مالاکیت - اکسیدهای آهن (شکل ۹- الف)، ۲- رگه‌های کلسیت، مالاکیت ۳- رگه‌های مالاکیت، کالکوسیت، کوارتز کریپتوکریستالین. ۴- رگه‌های هماتیت، کوارتز کریپتوکریستالین و مالاکیت است. ولی بیشتر رگه‌ها کلسیتی و فاقد کانی‌سازی می‌باشند (شکل ۹- ب). رگه‌ها در مقیاس نقشه قابل نمایش نبوده بنابراین محل رگه‌ها با نقطه مشخص شدند (شکل ۸).

و کاولیت می‌باشد. کانی سولفیدی اولیه در منطقه دیده نشد.
 - کانی‌سازی رگه‌ای: عمدتاً در قسمت‌های شمال، مرکز و غرب منطقه دیده می‌شود (شکل ۸). کانی‌زایی در رگه‌های سیلیسی - سولفیدی صورت گرفته‌است. سولفیدها تبدیل به مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و کاولیت شده‌اند. امتداد این رگه‌ها عمدتاً شمال غرب - جنوب شرق تا شمالی - جنوبی با شیب ۸۵ درجه تا قائم و با عرض حداکثر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند. طبق شواهد صحرایی، دگرسانی سیلیسی و آرژیلیکی عمده‌ترین دگرسانی حاشیه رگه‌ها است و ضخامت آنها



شکل ۸: نقشه کانی‌سازی منطقه مهرخش.



شکل ۹: الف) رگه کوارتز کریپتوکریستالین-اکسیدهای آهن-مالاکیت ب) رگه کلسیتی فاقد کانی‌سازی

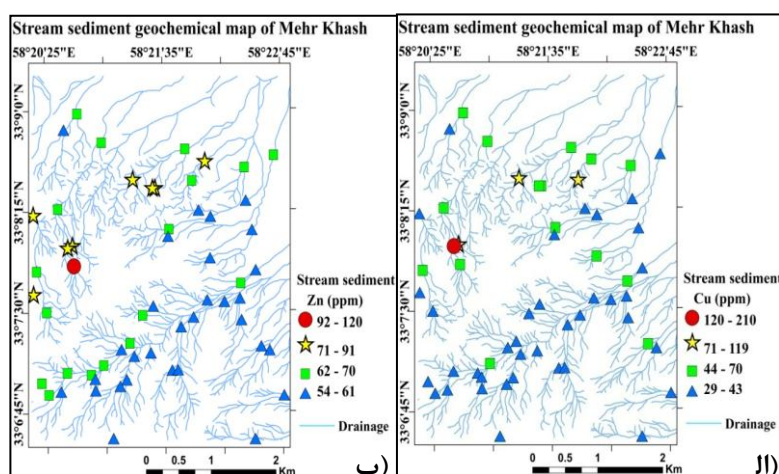
صورت، بر مبنای رسوبات آبراهه‌ای و خرده‌سنگی صورت گرفته است.

اکتشافات ژئوشیمیایی بر مبنای رسوبات آبراهه‌ای: در منطقه مطالعاتی اکتشافات ژئوشیمیایی بر مبنای رسوبات آبراهه‌ای بر روی ۵۷ نمونه توسط سازمان صنایع و معادن کشور انجام شده است (جمع، ۱۳۸۷). آنالیز نمونه‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای برداشت شده به روش ICP-MS با حلال تیزاب سلطانی (Aqua Regia) در آزمایشگاه ALS-CHEMX کانادا بوده است (جمع، ۱۳۸۷). نتایج بررسی‌های ژئوشیمیایی آبراهه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین مقدار مس، ۲۱۰ گرم در تن است (شکل ۱۰- الف). عمده بی-هنجاری مس در غرب منطقه مرتبط به آبراهه‌های منشا گرفته از واحدهای لیتیک توف و بیوتیت هورنبلند آندزیت و در ارتباط با آلتراسیون آرژلیک-کربناته- پروپلیتیک می‌باشد (شکل ۱۰- الف). این آبراهه در ارتباط با کانی‌سازی‌های رگه-ای در قسمت شمالی منطقه می‌باشد. درحالی‌که بی‌هنجاری‌های شمالی مرتبط به آبراهه‌های منشا گرفته از واحد هورنبلند کوارتز دیوریت پورفیری و در ارتباط با دگرسانی پروپلیتیک می‌باشد.

- کانی‌سازی پراکنده عمدتاً در شمال منطقه دیده می‌شود (شکل ۸). کانی‌سازی به صورت کوولیت و کالکوسیت در متن سنگ مشاهده می‌شود و بیشترین میزان کانی‌سازی پراکنده در واحدهای لیتیک توف و تراکی‌آندزیت و به میزان خیلی کمتر در واحد بیوتیت هورنبلند آندزیت دیده می‌شود. به دلیل تاثیر شدید فرایندهای هوازدگی بر کانی‌سازی اولیه، کانی‌سازی ثانویه سولفیدی و اکسیدی گسترش وسیعی داشته و شامل کانی‌های مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) و به میزان کمتر کالکوسیت و کوولیت می‌باشد که در منطقه به خوبی دیده می‌شود. وجود سیستم آبراهه‌ای گسترده در منطقه نقش مهمی در گسترده‌گی زون اکسیده داشته است. همچنین وجود دگرسانی کربناته و رگچه‌های کلسیتی در تشکیل مالاکیت به صورت گسترده در منطقه موثر بوده است.

ژئوشیمی

روش‌های ژئوشیمیایی، نقش مهمی در تعریف بی-هنجاری‌های مرتبط با کانسارهای دارای رخنمون و فاقد رخنمون دارند (روبرت و همکاران، ۲۰۰۷). در منطقه مطالعاتی اکتشافات ژئوشیمیایی به دو



شکل ۱۰: پراکندگی عناصر مس و روی در رسوبات آبراهه‌ای منطقه مهرخش به ترتیب الف و ب.

کوارتز دیوریت پورفیری و در ارتباط با دگرسانی پروپلیتیک می‌باشد. همبستگی خوبی بین بی-هنجاری‌های مس با روی دیده می‌شود. بیشترین مقدار برای مولیبدن $13/2$ ، نقره $0/07$ و طلا $0/022$ گرم در تن می‌باشد. نتایج آنالیزها برای آرسنیک و آنتیمون بی‌هنجاری قابل توجهی را نشان نمی‌دهند.

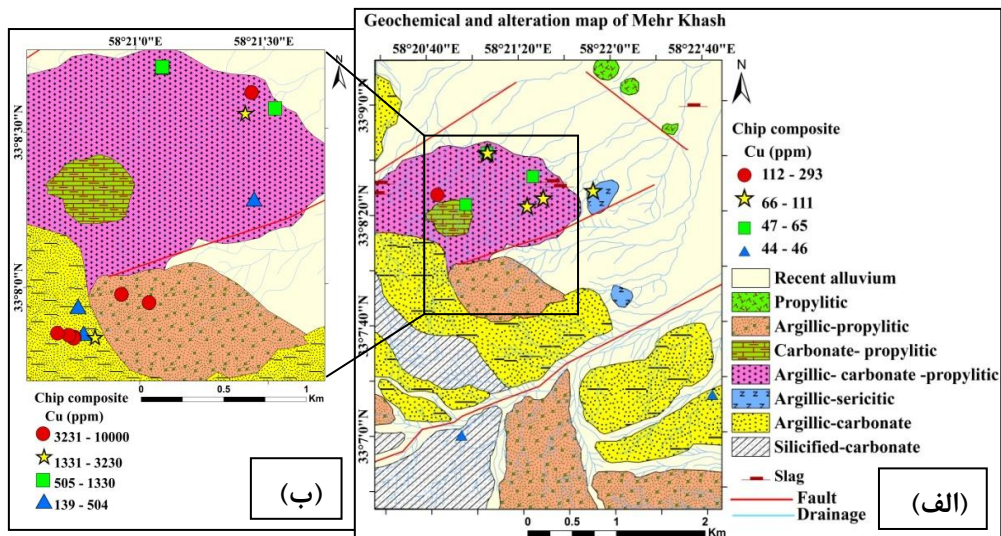
تن، سرب $399-18$ گرم در تن، طلا تا 50 میلی-گرم در تن و نقره $27/3-0/2$ گرم در تن می‌باشد (شکل ۱۱ تا ۱۳-ب). در نمونه‌های خرده‌سنگی آنالیز شده مربوط به کانی‌سازی پراکنده میزان فراوانی مس از 44 تا 293 گرم در تن متغیر است (شکل ۱۱-الف). بیشترین بی‌هنجاری‌های مس در شمال منطقه مربوط به واحدهای لیتیک توف و تراکی آندزیت می‌باشد. این واحدهای سنگی دگرسانی آرژیلیک-کربناته-پروپلیتیک را متحمل شده‌اند. میزان فراوانی سرب از 7 تا 296 گرم در تن متغیر است (شکل ۱۲-الف). بیشترین بی‌هنجاری‌های سرب در شمال منطقه مربوط به واحد لیتیک توف می‌باشد. این واحد سنگی دگرسانی آرژیلیک-کربناته-پروپلیتیک را متحمل شده‌است. میزان فراوانی روی از 12 تا 124 گرم در تن متغیر است (شکل ۱۳-الف). بیشترین بی‌هنجاری روی نیز منطبق بر واحد لیتیک توف می‌باشد. در نتایج آنالیز نمونه‌های خرده‌سنگی همبستگی خوبی بین بی‌هنجاری‌های مس با روی و سرب دیده می‌شود.

بیشترین مقدار برای روی، 120 گرم در تن (شکل ۱۰-ب) است. عمده بی‌هنجاری روی در قسمت-های غربی و شمالی منطقه می‌باشد. بی‌هنجاری غربی مرتبط به آبراهه‌های منشا گرفته از واحد های لیتیک توف و آندزیت و در ارتباط با دگرسانی‌های آرژیلیک-کربناته-پروپلیتیک می‌باشد در حالیکه بی‌هنجاری‌های شمالی مرتبط به آبراهه‌های منشا گرفته از واحدهای هورنبلند

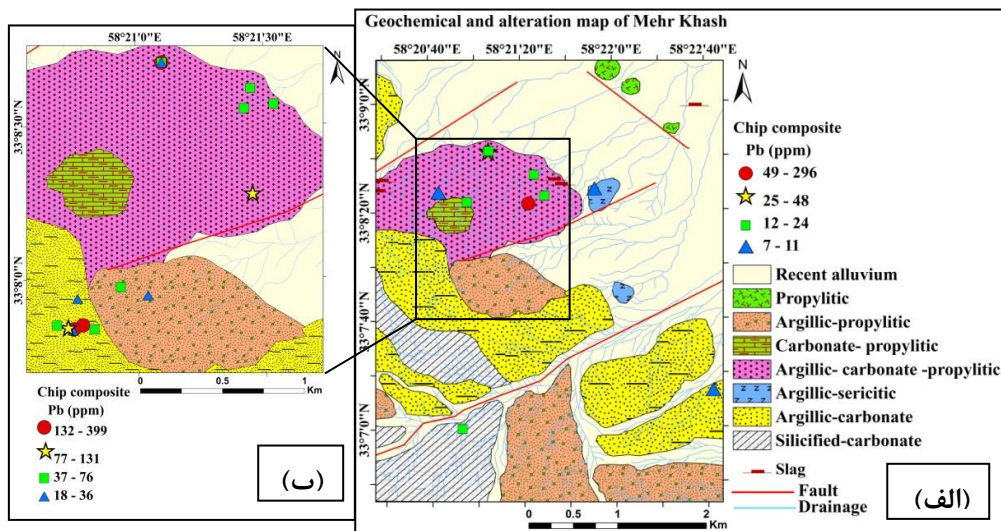
اکتشافات ژئوشیمیایی بر مبنای سنگ

در مطالعات ژئوشیمیایی بر مبنای سنگ، داده‌های حاصل از آنالیز 43 نمونه که توسط سازمان صنایع و معادن انجام گرفته است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جمع، 1387). برداشت این نمونه‌ها از زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی و به روش خرده‌سنگی صورت گرفته است. آنالیز نمونه‌های ژئوشیمی بر مبنای سنگ برداشت شده در آزمایشگاه ALS-CHEMخ کانادا به روش ICP-MS با حلال تیزاب سلطانی (Aqua Regia) بوده‌است. 16 نمونه از محل مربوط به رگه‌هایی که در قسمت‌های شمالی، مرکز و غرب منطقه قرار گرفته‌اند و 12 نمونه دیگر از زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی برداشت شده‌است.

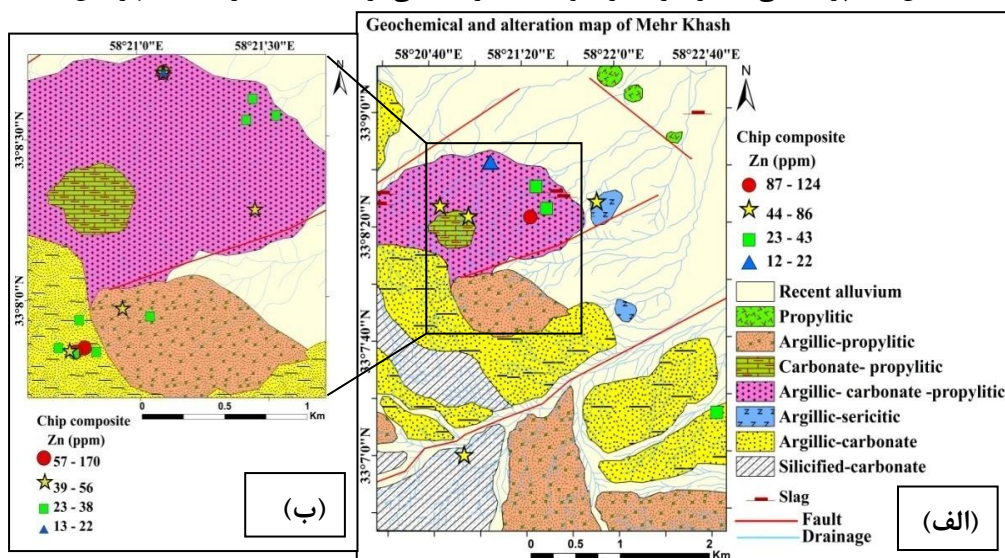
به منظور وضوح محل نمونه‌برداری‌های ژئوشیمی نقشه دگرسانی با مقیاس $1:5000$ از قسمت مرکزی تهیه شد (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳-ب). نمونه برداری از رگه‌هایی با ترکیب کوارتز کریپتوکریستالین، هماتیت، مالاکیت انجام شده-است. در 16 نمونه برداشت شده از محل رگه‌ها میزان تغییرات مس $4/35-0/13$ درصد، مولیبدن $2-34$ گرم در تن، روی $170-13$ گرم در



شکل ۱۱: پراکندگی عنصر مس در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده در منطقه مهرخش.



شکل ۱۲: پراکندگی عنصر سرب در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده در منطقه مهرخش.



شکل ۱۳: پراکندگی عنصر روی در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده در منطقه مهرخش.

بحث و نتیجه‌گیری

دگرسانی آرژیلیک-کربناته- پروپلتیک عمدتاً واحدهای لیتیک توف و تراکی‌اندزیت را در شمال منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر قرار داده‌است. کانی‌سازی در شمال به دو صورت رگه‌ای و پراکنده دیده می‌شود. رگه‌ها سیلیسی- سولفیدی بوده و دارای امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق تا شمالی- جنوبی هستند. نتایج ژئوشیمی رگه‌ها بی‌هنجاری‌های بالای مس و همچنین بی-هنجاری‌های سرب، روی و نقره را نشان می‌دهد. بیشترین میزان کانی‌سازی پراکنده در واحدهای لیتیک توف و اندزیت و به میزان کمتر در واحد بیوتیت هورنبلند اندزیت دیده می‌شود. نتایج ژئوشیمی مربوط به کانی‌سازی پراکنده بی-هنجاری‌های مس و سرب و تا حدودی روی را نشان می‌دهد.

دگرسانی آرژیلیک- پروپلتیک و آرژیلیک- کربناته عمدتاً در مرکز و غرب منطقه واحدهای اندزیتی و آذرآواری را تحت تاثیر قرار داده‌است. در این محدوده کانی‌سازی به صورت رگه‌ای بوده و در واحدهای اندزیتی و آذرآواری شکل گرفته است. نتایج ژئوشیمی رگه‌ها بی‌هنجاری‌های بالای مس را در این محدوده نشان داده، درحالی‌که سرب، روی و نقره بی‌هنجاری قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. توده کوارتز دیوریتی دگرسانی ضعیفی نشان می‌دهد. نبود کانی‌سازی و بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی قابل توجه در این توده، نشان می‌دهد که این توده در کانی‌سازی منطقه نقش ندارد. برای بررسی منشأ کانی‌سازی در این منطقه نیاز به مطالعات وسیع‌تر در محدوده شمال خور می‌باشد.

با توجه به وجود سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری، نوع دگرسانی‌ها، بی‌هنجاری بالای مس، بی-هنجاری‌های سرب، روی و نقره، حضور کانی‌سازی

به‌صورت رگه‌ای و پراکنده و ارتباط کانی‌سازی‌ها با سیستم شکستگی‌ها می‌توان کانسار مهرخش را در رده کانسارهای اپی‌ترمال نوع رگه‌ای مس (±سرب±روی) قرار داد.

تشکر و قدردانی: این پروژه با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد طبق طرح شماره ۲۲۷۳۱ مورخ ۱۳۹۱/۴/۱۳ انجام شده‌است. نویسندگان این مقاله از همکاری سازمان صنایع و معادن خراسان جنوبی، بخصوص آقای مهندس اشراقی و خانم مهندس خواجه میری تشکر می‌نمایند.

منابع

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۲. مطلبی چند درباره تشکیل حوضه رسوبی فلیش در شرق ایران و توجیه آن با تئوری تکتونیک صفحه‌ای، ضمیمه گزارش شماره ۲۲، سازمان زمین‌شناسی کشور، ص. ۶۷-۷۱.
- امامی، م.ح.، ۱۳۷۹. ماگماتیسم در ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۷۱، ۶۲۲ ص.
- جمیع، ع.ر.، ۱۳۸۶. اکتشاف نیمه‌تفصیلی مواد معدنی در شهرستان سرایان، شرکت پارس کانی و شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی، ۲۰۵ ص.
- جمیع، ع.ر.، ۱۳۸۷. پروژه اکتشاف تفصیلی مواد معدنی در شهرستان سرایان، سازمان صنایع و معادن استان خراسان جنوبی، ۲۰۴ ص.
- سامانی، ب. و اشتری، ش.، ۱۳۷۱. تکوین زمین شناسی ناحیه سیستان و بلوچستان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۴، سازمان زمین‌شناسی کشور، ص. ۱۴-۲۵.
- کریم‌پور، م.ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، فارمر، ل. و استرن، چ.، ۱۳۹۱. پتروژنز گرانیتوئیدها، سن سنجی زیرکن به روش U-Pb ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd و رخداد مهم کانی‌سازی ترشیری در بلوک

- لطفی، م.، ۱۹۹۵. نقشه زمین‌شناسی سارغنج، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.
- معصومی، ف. و رنجبر، ح.، ۱۳۸۷. مقایسه بین داده‌های تصحیح‌شده سنجنده ASTER با روش‌های نرمالیزه شده، میانگین بازتاب داخلی نسی و لگاریتم باقیمانده جهت نقشه‌برداری از کانی‌های مناطق دگرسان شده، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص. ۳۱۵-۳۱۲.
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, scale 1:2,900,000, Geological Survey of Iran.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Khatib, M.M., Priestley, K., Talebian, M., and Ghafuri-Ashtiani, M., 1999. The 1997 may 10 Zirkuh (Qaenat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran, *Geophys. J. Int* 136, p. 671-694.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18, p. 210 -265.
- Camp, V.E., and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in Sistan Suture Zone, *Lithos*, v. 15, p. 221- 239.
- ENVI User's Guide, 2003. ENVI User's Guide V. 4.0, Research Systems, Inc, P.1084.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, J. P., and Goetz, A. F. H., 1993. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive, v. 44, p. 145-163.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., and Karimpour, M.H., 2013. Hydrothermal alteration mapping in northern Khur, Iran, using ASTER image processing: a new insight to the type of copper mineralization in the area, *Acta geologica sinica*, In press, v. 87, p. 830-842.
- Pérez, D.J., Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., and Marín, G., 2000. Mineral mapping exploration using hyperspectral AVIRIS data in Los Menucos area, Río Negro province (67°51'W- 40°53'S), Argentina, p. 99-672.
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., and McEwan, C.J., 2007. Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Ore Deposits and Exploration Technology, v. 48, p. 691-711.
- Ruttner, A., and Stöcklin, J., 1967. Geological map of Iran, scale 1:1000,000, Geological Survey of Iran.
- Tarkian, M., Lotfi, M., and Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran, v. 51, p. 357- 383.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., and Camp, V.E., 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, v.94, p. 134 -150.