



کاربرد روشهای اکتشافی رسوب آبراهه‌ای و کانی سنگین در ارزیابی پتانسیل کانی‌سازی بازالت‌های سلطان میدان (شمال شاهرود)

مه‌دی هاشمی‌گهروئی^{*}، بهنام شفیعی^۱، غلامحسین شمعانیان^۱، حسین تقی‌زاده^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، گرگان

(۲) امور اکتشافات و مهندسی توسعه، مجتمع مس سرچشمه، شرکت ملی صنایع مس ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۷/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۹

چکیده

به منظور ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی مس و دیگر عناصر همراه در تشکیلات بازالتی سلطان میدان واقع در شمال شاهرود، روش رسوب آبراهه‌ای و کانی سنگین مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور، تعداد ۶۸ نمونه رسوب آبراهه‌ای (اندازه ذرات ۸۰- مش) و ۶ عدد نمونه کانی سنگین (اندازه ذرات ۲۰- مش) از شبکه نمونه‌برداری بهینه برداشت گردید. نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای عناصر مس، سرب، روی، کبالت، منگنز، آهن و نیکل تجزیه شدند. پردازش آماری داده‌های زمین‌شیمیایی منجر به شناسایی عناصر با مقادیر غیرعادی، تفکیک مقادیر غیرعادی از مقادیر زمینه و همچنین روابط بین عناصر شد. در بین عناصر، مس و نیکل دارای نمونه‌های با ناهنجاری درجه یک و قوی بودند. روابط بین عناصر نشان داد که آهن، سرب و روی با یکدیگر و با عناصر کبالت و منگنز همبستگی مثبت قوی ($r \geq 0.5$) نشان داده‌اند. مطالعه نمونه‌های کانی سنگین، وجود کانیهای مگنتیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، پیریت، پیریت اکسید شده، آخری، باریت، آپاتیت، روتیل، زیرکن، نیگرین، آنتاز، اسفن، لوکوکسن، طلا و کانیهای سیلیکاته فرومنیزین را نشان داد. پردازش آماری داده‌های مربوط به نمونه‌های کانی سنگین، ارتباط معنی‌داری را بین کانی‌سازی طلا و تیتانیوم با اکسیدهای آهن نشان داد. نتایج حاصل از پردازش داده‌های زمین‌شیمیایی و تلفیق آنها با نتایج حاصل از الگوی توزیع شکستگیها در منطقه مورد مطالعه انطباق خوب ناهنجاریهای زمین‌شیمیایی بر مناطق با تراکم شکستگی را نشان داد که بر این اساس مناطق امیدبخش برای کانه‌زایی مس و تیتانیوم شناسایی و جهت انجام اکتشافات بیشتر پیشنهاد می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف زمین‌شیمیایی، رسوب آبراهه‌ای، کانی سنگین، ضریب خط‌وارگی تصویری، بازالت‌های سلطان میدان، شمال شاهرود.

مقدمه

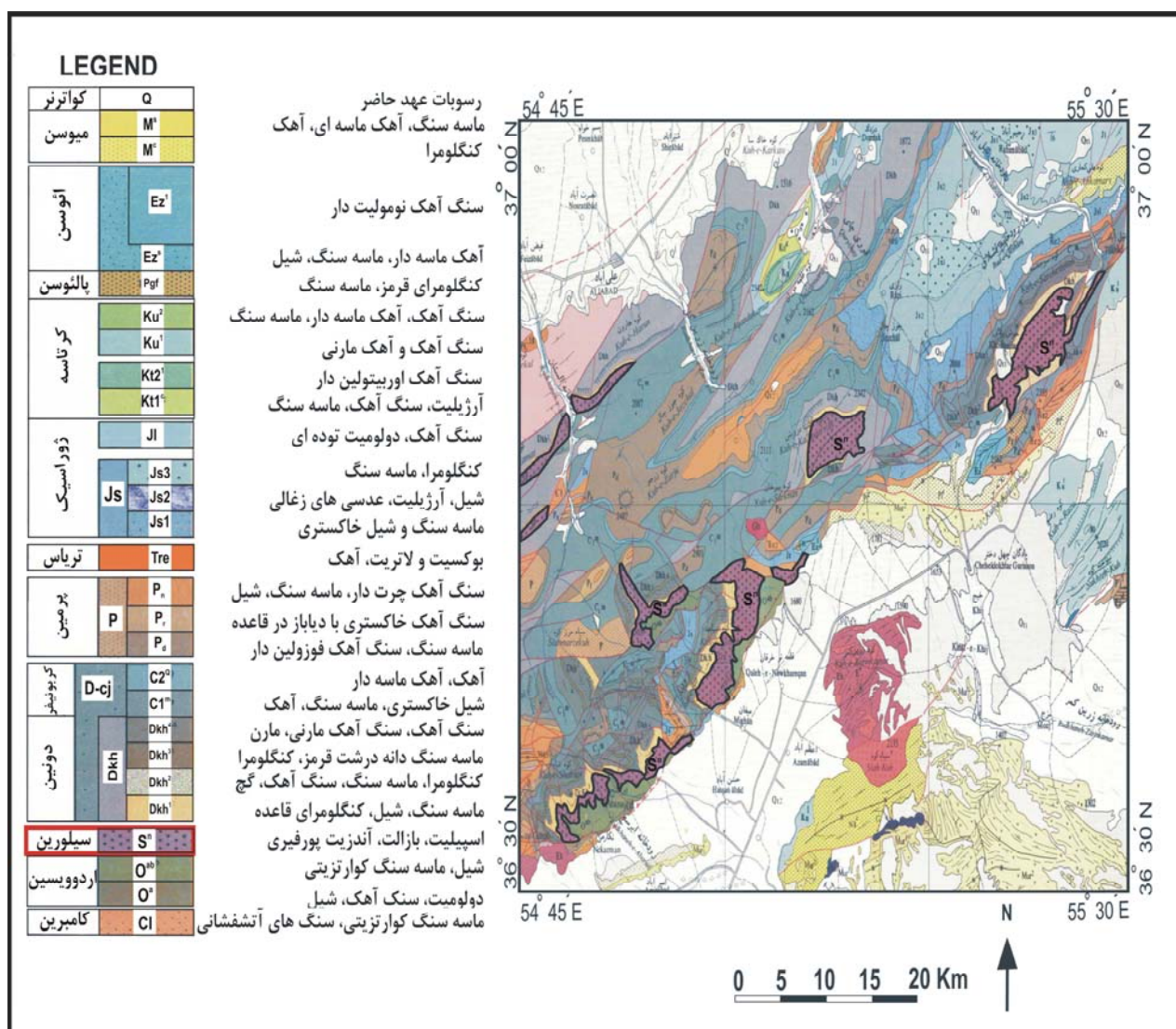
روی، آرسنیک، آنتیموان، کبالت و نیکل دارای کاربرد وسیعی است، ولی با اندازه‌گیری عناصر دیگری مثل نقره، جیوه، مولیبدنوم و بیسموت می‌توان از آن به عنوان نشانه کانی‌سازی کانسارهای دیگر استفاده کرد. روش رسوب آبراهه‌ای در واقع یک نمونه ترکیبی از عوارض فرسایش یافته از سنگهای بالادست حوضه آبریز است. بنابراین وجود ناهنجاریها در این رسوبات از وجود یک منبع پرعیار در بالادست آن حکایت می‌کند. بروز ناهنجاریها در محل آبراهه‌ها خود نشان‌دهنده کانسار در محل نیست، بلکه با توجه به تحرک عناصر می‌توان منشأ اولیه این عناصر یعنی توده کانساری را با توجه به اطلاعات به دست آمده شناسایی کرد [۱]. اساس روش اکتشاف زمین‌شیمیایی رسوب آبراهه‌ای بر مبنای هاله‌های انتقال یافته

روشهای اکتشاف زمین‌شیمیایی رسوب آبراهه‌ای و کانی سنگین روشهایی مناسب، ارزان و مکمل یکدیگر در مرحله مقدماتی اکتشاف ذخایر معدنی پنهان می‌باشند. انطباق زون‌های تمرکز یافته از کانیهای سنگین با ناهنجاریهای عنصری در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای تأییدی بر حضور کانی‌سازی در سنگهای در برگیرنده حوضه آبریز می‌باشند. در استفاده بهینه از روشهای مذکور در امر اکتشاف، داشتن شناخت کافی از رفتار کانیها و همچنین عناصر در محیطهای زمین‌شیمیایی ثانویه یعنی محیطهای رسوبی ضروری است. روش اکتشاف زمین‌شیمیایی رسوبات آبراهه‌ای برای اکتشاف کانسارهای چندفلزی مثل کانسارهای حاوی عناصر مس، سرب،

*مسئول مکاتبات: hashemi_m2009@yahoo.com

دوین حضور دارند که به تشکیلات سلطان میدان [۳] یا نکارمن [۴] شهرت دارند (شکل ۱). بر پایه موقعیت آنها در ستون چینه‌شناسی، سن نسبی سیلورین را به این سنگهای آذرین نسبت داده‌اند [۵] و در کمیته چینه‌شناسی ایران، آن را به عنوان تشکیلات غیررسمی پذیرفته‌اند. بر پایه نتایج حاصل از طرح "پی‌جویی و پتانسیل‌یابی مواد معدنی در سازند آتشفشانی نکارمن (سلطان میدان)" در نواحی تیل‌آباد و خوش‌بیلاق [۶]، سنگهای مذکور آثار دگرسانی گرمابی همراه با کانه‌زایی مس را نشان داده‌اند.

نمایان [۲] استوار است. این هاله‌ها در واقع بر مبنای مهاجرت عناصر در رسوبات آبراهه‌ای ایجاد می‌شوند. در کنار روش رسوبات آبراهه‌ای، روش مطالعه کانیهای سنگین نیز در دستور کار قرار گرفته است. در دامنه جنوبی البرز شرقی (نواحی تیل‌آباد-خوش‌بیلاق، کوه قاسم، ابر-برسج در شمال شاهرود و دامغان) هم مرز با واحد ساختاری ایران مرکزی و همچنین بخشهایی از دامنه شمالی البرز شرقی (جنوب گرگان، علی‌آباد و آزادشهر) سنگهای آذرین به شکل گدازه با ترکیب سنگ‌شناسی بازالت تا آندزیت و کمتر به شکل آذرآواری (توف و ایگنمبریت) با ترکیب ریولیتی در میان واحدهای رسوبی اردوویسین و



شکل ۱. بخشی از ورقه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان [۵] که در آن تشکیلات سلطان میدان با روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب در بین واحدهای رسوبی دوران پالئوزوئیک البرز شرقی قرار گرفته‌اند.

از کشتش و کافت در پوسته قاره‌ای ایران زمین معرفی شده است که به زایش تیتیس کهن^۲ در پالئوزوئیک پسین در شمال ایران انجامیده است [۱۰ و ۱۱]. حاصل این شکل‌گیری مجموعه ضخیم لایه از سنگهای آذرین درونی و بیرونی (با ضخامت نزدیک به ۱۰۰۰ متر) به سن اردوویسین میانی تا دونین بوده است که به طور بارز دارای ترکیب بازالتی اند و البته سنگهای آتشفشانی از نوع سنگهای آذرآواری با میان لایه‌هایی از جریانهای آندزیتی است. از نظر موقعیت چینه‌شناسی، این بازالت‌ها بر روی سازند محلی ابرسج (معادل سازند شیرگشت) به سن اردوویسین که شامل ماسه‌سنگهای آرکوزی زیتونی‌رنگ مسکویت‌دار است، قرار می‌گیرند و خود توسط سازند پادها به سن دونین زیرین که شامل ماسه‌سنگهای صورتی کوارتزآرنایت می‌باشد به شکل ناپیوستگی آذرین‌پی هم‌شیب پوشیده می‌شود [۱۱]. بارزترین واحدهای سنگی از قدیم به جدید در توالی چینه‌شناسی این تشکیلات عبارتند از: مجموعه آهک دولومیتی، مارن و توف (سازند خوش‌بیلایق به سن دونین میانی- فوقانی)، آهک، شیل و آهک شیلی (سازند مبارک به سن کربونیفر زیرین)، ماسه‌سنگ کوارتزیتی و شیل سیلتی (سازند دورود به سن پرمین زیرین)، دولومیت، آهک دولومیتی و ماسه‌سنگ (سازند الیکا به سن تریاس)، ماسه‌سنگ، شیل و کنگلومرا (سازند شمشک به سن ژوراسیک زیرین)، مارن سبز گچ‌دار با لایه‌های ماسه‌سنگی به سن میوسن و نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر (شکل ۲).

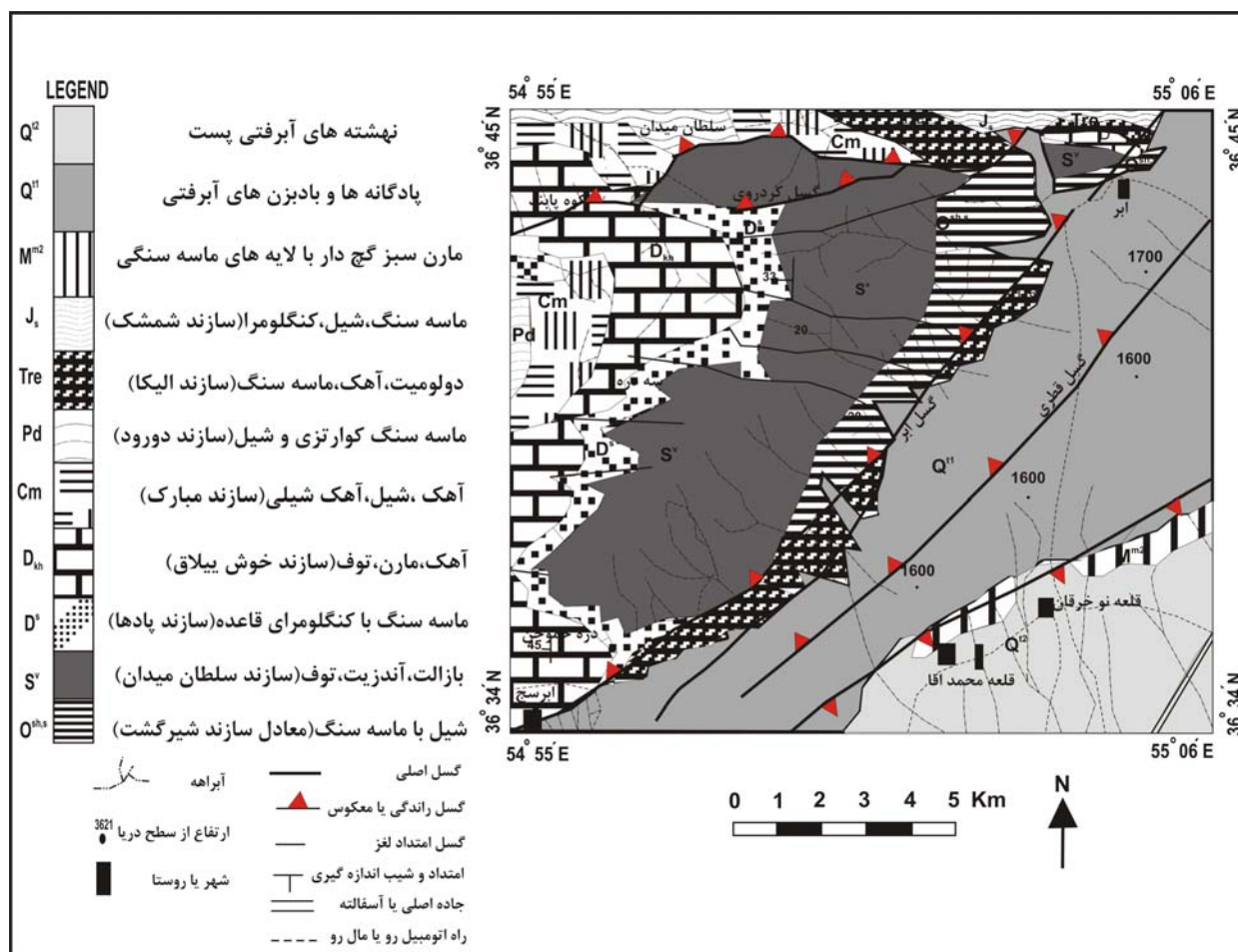
روش مطالعه

برای انجام عملیات نمونه‌برداری ابتدا شبکه نمونه‌برداری طراحی شد (شکل ۳). برای این طراحی، ابتدا طرح کلی آبراهه‌های ناحیه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ ابرسج و قلعه نوخرقان رسم شد. سپس نقشه زمین‌شناسی منطقه به صورت یک لایه اطلاعاتی بر روی آن قرار گرفت و محل ۶۲ نمونه زمین‌شیمیایی و ۶ نمونه کانی سنگین در پایین‌دست گسلها، همبریه‌های مهم زمین‌شناسی، مناطق با چگالی گسلی بالا تعیین شد. چگالی شبکه نمونه‌برداری برای نمونه‌های زمین‌شیمیایی، یک نمونه به ازای هر کیلومتر مربع و برای نمونه‌های کانی سنگین، یک نمونه به ازای هر ۱۰ کیلومتر مربع می‌باشد.

بر پایه نقشه توزیع کانسارها در ایران [۷] و همچنین نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان [۴] و ۱:۱۰۰۰۰۰ علی‌آباد [۸] و خوش‌بیلایق [۹]، آثار کانه‌زایی مس در تشکیلات آذرین سلطان میدان در محدوده بین روستای ابر و ابرسج (دامنه جنوبی البرز شرقی) نشان داده شده است. بر اساس داده‌های موجود، تشکیلات سلطان میدان از نوع بازالت‌های قلیایی در یک رژیم کششی (کافت^۱) درون‌ورقه‌ای تشخیص داده شده‌اند [۱۱]. همراهی سولفیدهای مس، کربنات‌های آبدار مس، اکسیدهای آهن و ژاسپر در اغلب نقاط این مجموعه آتشفشانی مافیک با دو نوع تجمعات دگرسانی گرمایی حرارت بالا و حرارت پایین، وجود آثار کانی‌سازی سولفید توده‌ای آتشفشانی را محتمل می‌سازد. در اغلب نمونه‌های تجزیه شده در این منطقه، عناصر سرب، روی و تیتانیم تمرکز بالایی نشان داده‌اند. همچنین وجود کانی‌سازی مس از نوع سولفید توده‌ای با سنگهای بازالتی منطقه ابرسج محتمل دانسته شده است [۱۱]. با توجه به رخنمون بیشتر و مناسبتر تشکیلات بازالتی مذکور در محدوده روستای ابر تا ابرسج (شمال شاهرود)، تراکم بیشتر شبکه آبراهه‌ای و زه‌کشی مناسب، وجود مناطق با حداکثر شکستگی و خردشدگی، مناسب بودن راههای دسترسی و شرایط آب و هوایی مناسب از لحاظ بارندگی (از ۱۰۰ تا حدود ۶۰۰ میلی‌متر در سال) و دما (از ۴۰+ درجه سانتی‌گراد در تابستان تا ۱۲- درجه سانتی‌گراد در زمستان)، منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی ۵۵° ۵۴' تا ۵۵° ۰۶' طول شرقی و ۳۴' ۳۶° تا ۴۵' ۳۶° عرض شمالی، واقع در شمال شاهرود به منظور ارزیابی پتانسیل کانی‌سازی با روش اکتشافی رسوب آبراهه‌ای و کانی سنگین انتخاب گردید (شکل ۲). اصلی‌ترین راه دسترسی به منطقه مورد مطالعه، جاده درجه یک گرگان- آزادشهر- شاهرود است که از آن چندین جاده فرعی با جهت‌های شمالی- جنوبی به درون رخنمونهای مذکور جدا می‌شود.

زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه

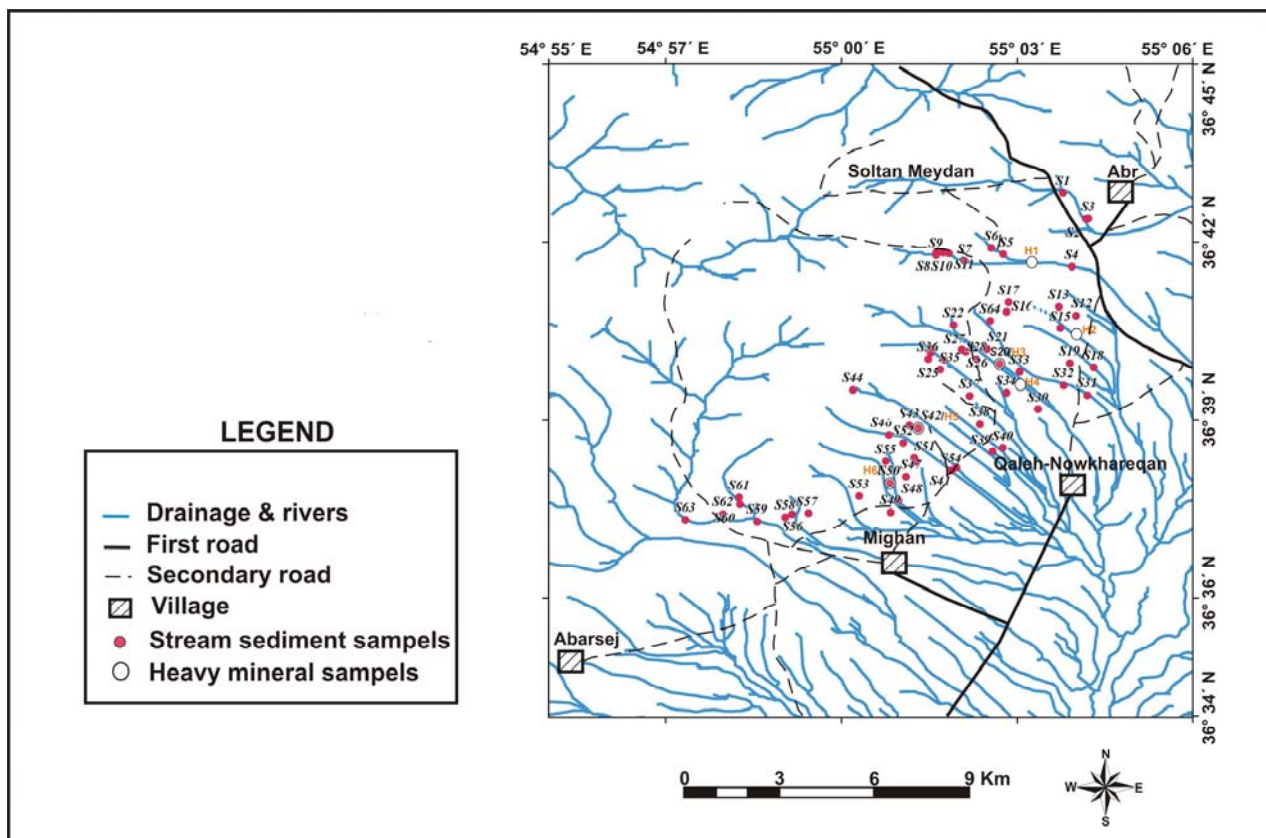
فوران آتشفشانهای مافیک قلیایی با ساخت و بافت بالشی همراه با جای‌گیری توده‌های نفوذی با همین سرشت در همراهی نزدیک با گسلش عادی و حضور رخساره‌های توریدایتی محیط دریایی عمیق در دوره زمانی اردوویسین- سیلورین شواهد ناشی



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در حدفاصل روستای ابر تا ابرسج [۹۰۸]

زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به نوع و ماهیت مطالعه (نمونه‌برداری از آب‌راه‌ها) و به منظور شناسایی نقش شکستگیهای ساختاری در کنترل و تمرکز ناهنجاریهای زمین‌شیمیایی، با استفاده از پردازش داده‌های رقومی و تصاویر ماهواره‌ای، شکستگیها و گسلهای مختلف در منطقه مورد مطالعه استخراج شد. برای بررسی هرچه بهتر خطواره‌ها از فیلترگذاریهای مختلفی بر روی تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺ با قدرت تفکیک ۱۵ متر و همچنین تصاویر ASTER جهت استخراج هر چه بهتر شکستگیها [۱۲] استفاده گردید. برای دستیابی به وضوح بالای تصویر از ترکیب باندی مرئی (VNIR) با ترتیب 1-3(N)-2 و باند 3(B) در بالاترین قسمت (وضوح ۱۵ متر) استفاده شد. در ادامه با اعمال فیلترهای ریخت‌شناسی و جهت‌دار در زوایای مختلف (۴۵، ۹۰ و ۱۳۵) و با اندازه مغزه ۳×۳، وسیعترین و بهترین تغییرات شکستگی تهیه و استخراج گردید.

نمونه‌برداری از محل‌های از پیش تعیین شده بر روی نقشه و با استفاده از الک ۸۰- مش برای نمونه‌های زمین‌شیمیایی و با الک ۲۰- مش برای نمونه‌های کانی سنگین، از عمق ۲۰ الی ۳۰ سانتیمتری انجام گرفت. نمونه‌های زمین‌شیمیایی برداشت شده پس از خردایش و نرمایش تا اندازه ۲۰۰- مش، توسط آزمایشگاه مرکزی مجتمع مس سرچشمه کرمان برای عناصر مس، سرب، روی، کبالت، منگنز، آهن و نیکل با روش جذب اتمی تجزیه شیمیایی شدند. همچنین به منظور کنترل دقت آزمایشها، ۶ نمونه تکراری نیز از بین نمونه‌های فوق به صورت تصادفی انتخاب و تجزیه شد. آماده‌سازی نمونه‌های کانی سنگین شامل گل‌شویی و لاوک‌شویی بود. سپس مراحل حجم‌سنجی انجام گرفت و در نهایت حجم جزء سنگین نمونه برآورد شد. سپس از طریق به کارگیری آهن‌رباهایی با بار معین، جزء سنگین به سه بخش (فرومغناطیس، پارامغناطیس و غیرمغناطیس) تقسیم و حجم هر یک تعیین شد. نمونه‌های کانی سنگین پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه سازمان



شکل ۳. شبکه نمونه‌برداری طراحی شده برای برداشت نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای (S) و کانی سنگین (H).

ترسیم شد تا بتوان نقش آن را در کنترل ناهنجاریهای احتمالی مورد بررسی قرار داد.

نتایج

پس از تجزیه شیمیایی نمونه‌ها، ابتدا دقت تجزیه شیمیایی با استفاده از روش محاسباتی تعیین شد (کمتر از ده درصد)، که مقادیر حاصل از دقت قابل قبول برخوردار بودند. در اکتشافات زمین‌شیمیایی به روش رسوبات آبراهه‌ای، صرف نظر از مؤلفه آلودگی شیمیایی، تغییرپذیری از حالت نرمال دارای دو مؤلفه همزاد و غیرهمزاد است که مؤلفه همزاد در ارتباط با مؤلفه سنگ‌زایی و مؤلفه غیرهمزاد در ارتباط با مؤلفه کانی‌سازی بوده و به عنوان یک مؤلفه مفید اکتشافی شناخته می‌شود. مقدار زمینه یک سنگ ممکن است از یک ناحیه به ناحیه دیگر تغییر کند و یا ممکن است مؤلفه همزاد چنان قوی باشد که مؤلفه غیرهمزاد را محو کند [۱۵]. لذا برای از بین بردن اثر مؤلفه همزاد، با قرار دادن نقشه نمونه‌برداری بر روی نقشه زمین‌شناسی، سنگهای بالادست هر نمونه زمین‌شیمیایی که در تولید رسوب آبراهه‌ای مربوط به هر نمونه نقش داشته‌اند،

در مرحله بعد با استخراج لایه شکستگیها به محاسبه ضریب خطوارگی تصویری^۳ (PF) اقدام شد. این روش به عنوان یک الگوی پذیرفته شده جهت محاسبه ضریب خطوارگی در تصاویر ماهواره‌ای و عکسهای هوایی معرفی شده است [۱۲ و ۱۳ و ۱۴]. اساس روش مذکور بر پایه رابطه زیر است:

رابطه (۱)

$$PF = \frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C}$$

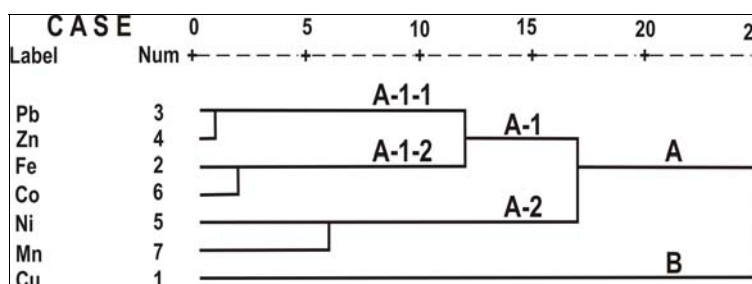
در این رابطه a تعداد خطواره‌ها در هر سلول و A میانگین آنها در نقشه، b طول خطواره‌ها در هر سلول و B میانگین آنها در نقشه، c تعداد تقاطع خطواره‌ها در هر سلول و C میانگین آنها در نقشه است. بر اساس این مؤلفه‌ها، برای تحلیل خطواره‌ها یک شبکه سلولی مناسب با ابعاد ۱×۱ کیلومتر برای منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد و روی نقشه خطوارگی منطقه پیاده گردید و مؤلفه‌های مذکور به طور جدا در هر سلول محاسبه شد. سپس نقشه ضریب خطوارگی منطقه مورد مطالعه

مس با هیچ عنصری همبستگی نشان نمی‌دهد. عناصر آهن و سرب هر کدام با عناصر روی، کبالت و منگنز همبستگی بالایی ($r \geq 0.5$) نشان می‌دهند که این امر مؤید شبیه بودن رفتار زمین‌شیمیایی عناصر آهن و سرب با عناصر روی، کبالت و منگنز در محیط‌های زمین‌شیمیایی ثانویه است. عنصر روی با عناصر کبالت و منگنز همبستگی بالایی ($r \geq 0.5$) نشان می‌دهد. در این مطالعه از دسته‌بندی خوشه‌ای نیز استفاده شد که نمودار ترسیم شده به کمک روش مرکزی به عنوان بهترین نمودار شناخته شده است (شکل ۴). در نمودار دسته‌بندی خوشه‌ای، اکثر عناصر در گروه A قرار می‌گیرند که مؤید وجود همبستگی بین آنهاست. در گروه B فقط عنصر مس قرار می‌گیرد که با عناصر دیگر همبستگی نشان نمی‌دهد.

تفکیک و در غالب جوامع مختلف سنگی طبقه‌بندی شدند. پس از تفکیک و طبقه‌بندی جوامع سنگی، مقدار زمینه محلی (که در واقع مقدار میانه مربوط به هر جامعه می‌باشد) محاسبه شد و سپس با تقسیم یافته‌های خام مربوط به هر یک از عناصر در هر جامعه بر مقدار زمینه محلی، مقادیر شاخص غنی‌شدگی محاسبه گردید. نرمال بودن مقادیر به دست آمده توسط نرم‌افزار SPSS 16.0 و بر اساس آزمون کولموگراف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت که بیانگر نرمال بودن تابع توزیع داده‌ها بود. پردازش آماری تک‌متغیره و چندمتغیره بر روی داده‌ها انجام شد و در نهایت ضرایب همبستگی برای عناصر مختلف به روش پیرسون برای یافته‌های به‌هنجار شده، محاسبه گردید (جدول ۱). بر اساس نتایج به دست آمده از این جدول، عنصر

جدول ۱. ضرایب همبستگی محاسبه شده با روش پیرسون بین عناصر مورد بررسی

	مس	آهن	سرب	روی	نیکل	کبالت	منگنز
مس	۱						
آهن	۰/۰۱۸	۱					
سرب	۰	۰/۶۶۱	۱				
روی	-۰/۰۴۸	۰/۷۷۴	۰/۸۷۰	۱			
نیکل	۰/۰۶۸	۰/۷۷۴	۰/۳۷۹	۰/۴۸۲	۱		
کبالت	-۰/۰۴۹	۰/۵۳۲	۰/۷۶۰	۰/۸۴۸	۰/۲۴۳	۱	
منگنز	-۰/۰۳۲	۰/۸۴۵	۰/۷۲۹	۰/۸۱۷	۰/۶۲۲	۰/۶۷۹	۱



شکل ۴. دسته‌بندی خوشه‌ای بهینه برای عناصر مورد مطالعه

یک باشد و مجموع آنها در حدود ۷۵ درصد واریانس تجمعی جامعه نمونه‌برداری را پوشش دهند، برای تجزیه تحلیل مؤلفه‌ها می‌تواند مناسب باشد. به طوری که در نهایت دو عامل استخراج گردید که عامل اول شامل عناصر آهن، سرب، روی، کبالت و منگنز با ضرایب مثبت است. عامل دوم شامل عناصر مس و نیکل با ضرایب مثبت و عنصر کبالت با ضرایب منفی می‌باشد. در نهایت برای تفکیک ناهنجاریهای زمین‌شیمیایی، از روش

به منظور تحلیل بهتر بر روی داده‌های به‌هنجار شده، تحلیل عاملی (تحلیل فاکتوری) نیز انجام شد. برای مشخص کردن صحت و تأیید تجزیه و تحلیل عاملی از پارامترهای KMO، دترمینان ماتریس ضریب همبستگی و آزمون بارتلت استفاده شد [۱۶]. برای تعیین تعداد عاملها از مقادیر ویژه ماتریس همبستگی، درصد تجمعی واریانس و نمودار صخره‌ای استفاده شده است. به این ترتیب عاملهایی که مقدار ویژه آنها بیش از

است) را به عنوان زمینه و فراوانی ۹۷/۵ درصد (که معادل $X \pm 2S$ است) را به عنوان حد آستانه‌ای در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. همچنین مقادیر بین $X \pm 2S$ و $X \pm 3S$ را به عنوان ناهنجاری ممکن (ناهنجاری درجه ۳) و مقادیر بین $X \pm 3S$ و $X \pm 4S$ را به عنوان ناهنجاری احتمالی (ناهنجاری درجه ۲) و مقادیر بزرگتر از $X \pm 4S$ (که شامل ۰/۱ درصد از کل داده‌ها می‌شود) را به عنوان ناهنجاری قطعی (ناهنجاری درجه ۱) معرفی شده است [۱۹]. برای محاسبه مقادیر زمینه، حد آستانه‌ای و ناهنجاریها از نسبتهای فوق استفاده شده است و در نهایت تعداد نمونه‌های ناهنجار مربوط عناصر و عاملهای مورد بررسی برآورد گردید (جدول ۲).

میانه به اضافه ضرایب مختلفی از انحراف معیار استفاده شده است زیرا میانه مستقل از توزیع داده‌هاست و همچنین مقدار میانه مستقل از مقادیر کرانه‌ای تابع توزیع است. این ویژگی باعث می‌شود که مقدار میانه تحت تأثیر مقادیر خارج از رده (ناهنجاریها) قرار نگیرد. در حالی که میانگین تحت تأثیر این مقادیر قرار گرفته و باعث بالا رفتن مقدار زمینه و در نتیجه کاهش شدت ناهنجاریها می‌گردد. شرط اصلی استفاده از این روش، نرمال بودن توزیع داده‌هاست [۱۷]. در یک توزیع نرمال، ۶۸/۲۶ درصد داده‌ها در محدوده $X \pm S$ ، ۹۵/۴۴ درصد داده‌ها در محدوده $X \pm 2S$ و ۹۹/۷۴ درصد داده‌ها در محدوده $X \pm 3S$ قرار دارند. بر این اساس، فراوانی ۵۰ درصد را (که معادل $X \pm S$ است) به عنوان میانه، فراوانی ۸۴/۵ درصد (که معادل $X \pm S$

جدول ۲. ناهنجاریهای محاسبه شده برای عناصر و عاملهای مورد بررسی.

متغیر	ناهنجاری درجه ۳	ناهنجاری درجه ۲	ناهنجاری درجه ۱
مس	-	۲	۱
آهن	۱	۱	-
سرب	۲	۱	-
روی	۲	۱	-
نیکل	-	-	۲
کبالت	۴	-	-
منگنز	۲	-	-
عامل اول	۴	-	-
عامل دوم	۲	۲	-

ترسیم شد (جدول ۳). از همبستگیهای مهم در این جدول می‌توان به همبستگی کانی مگنتیت با کانیهای هماتیت، پیروکسن، اسفن و آناز و همچنین کانی گوتیت با کانیهای پیریت هوازده، آخری و سلسنتین اشاره کرد. کانی آپاتیت نیز با کانیهای روتیل، طلا و نیگرن همبستگی نشان می‌دهد. بنابراین همراهی کانیهای تیتان دار با طلا را می‌توان به عنوان یک معیار اکتشافی معرفی کرد. در این مطالعه، به منظور دسته‌بندی کانیها از آنالیز خوشه‌ای استفاده شده که نمودار ترسیم شده به کمک روش دورترین همسایگی^۴ به عنوان بهترین نمودار شناخته شده است (شکل ۶). بر اساس نمودار خوشه‌ای، سه نوع کانی‌سازی در منطقه قابل تشخیص است که کانی‌سازیهای اکسید آهن، تیتان و طلا از آن جمله‌اند. در آنالیز عاملی انجام شده، بر اساس نتایج حاصل از دسته‌بندی

مطالعات کانی سنگین

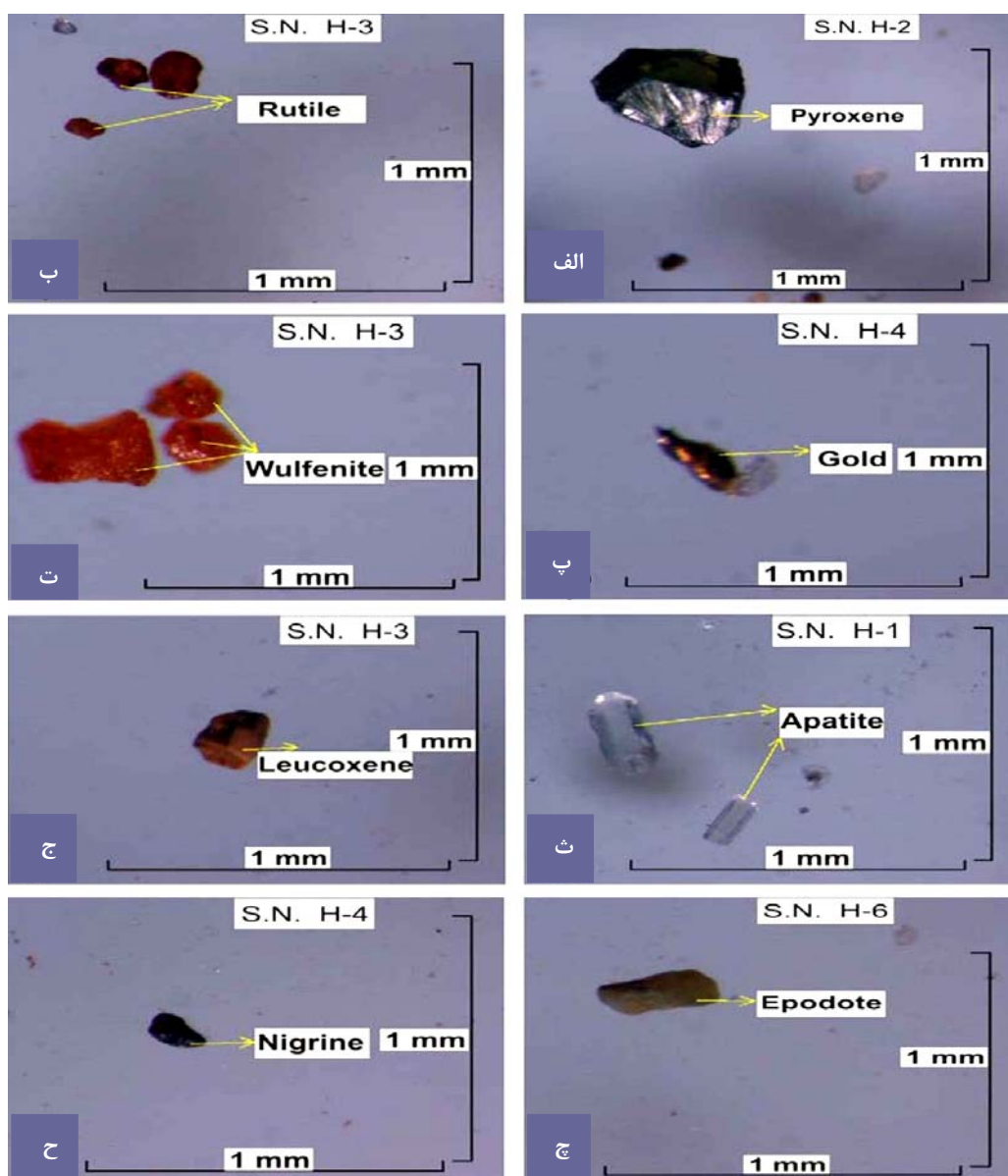
سه بخش جدا شده (فرومگناطیس، پارامگناطیس و غیرمگناطیس) از بخش کانیهای سنگین با استفاده از میکروسکپ دوچشمی مورد مطالعه قرار گرفت. از مهمترین کانیهای مشاهده شده می‌توان به پیروکسن، روتیل، طلا، ولفنیت، آپاتیت، لوکوکسن، اپیدوت، نیگرن اشاره کرد (شکل ۵). از این طریق نسبت درصد هر کانی در نمونه به روش حجمی برآورد گردید و سپس مقدار کمی هر کانی در کل نمونه کانی سنگین مورد نظر بر حسب ppm محاسبه شد [۲۰]. پردازش آماری تک‌متغیره و چندمتغیره (همبستگی بین متغیرها، آنالیز خوشه‌ای و آنالیز فاکتوری) بر روی داده‌های کانی سنگین صورت گرفت. در این تحقیق، به دلیل نرمال بودن داده‌ها، از روش پیرسون اقدام به بررسی همبستگی بین متغیرها شده و در نهایت ماتریس همبستگی به روش پیرسون

6- Furthest neighbor

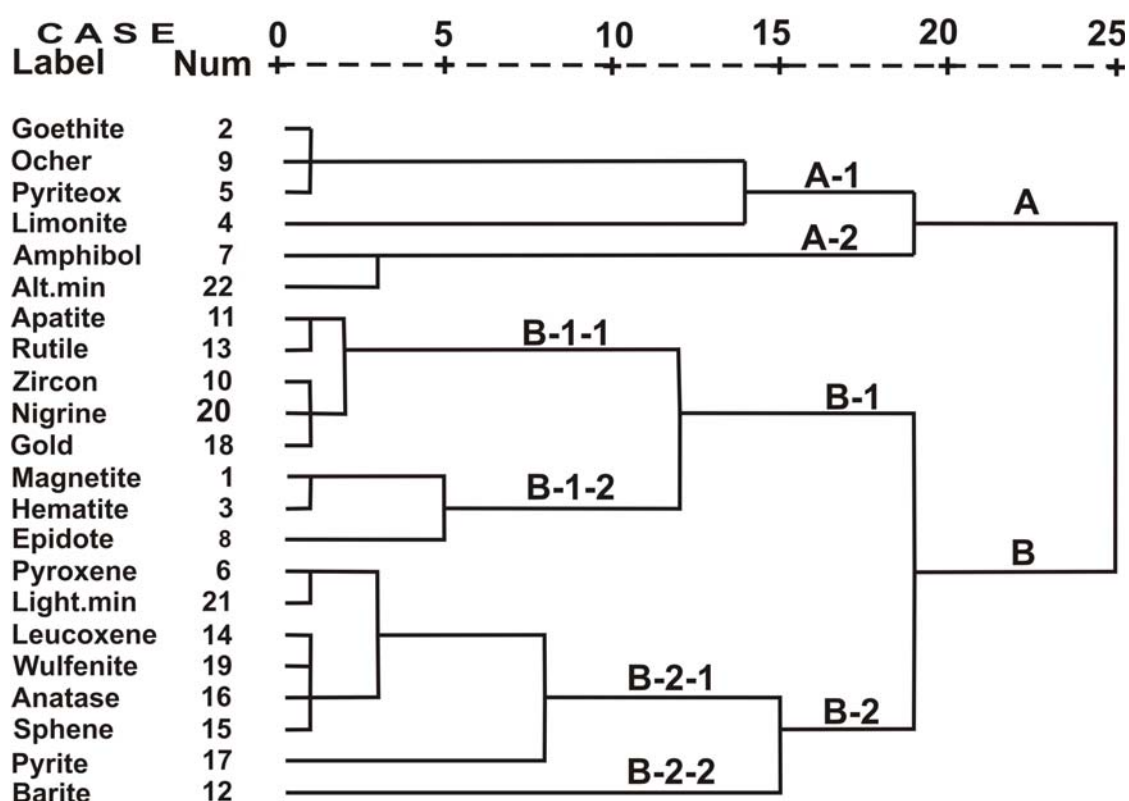
ب- عامل دوم (F2): متشکل از کانیه‌های آپاتیت، روتیل، زیرکن، نیگرین و طلا؛
 پ- عامل سوم (F3): متشکل از کانیه‌های مگنتیت، هماتیت و اپیدوت؛
 ت- عامل چهارم (F4): متشکل از کانیه‌های پیروکسن، لوکوکسن، ولفنیت، آنتاز و اسفن؛

خوشه‌ای و بررسی میزان همبستگی بین کانیه‌ها و نیز میزان فراوانی کانیه‌های مورد نظر در نمونه‌های مورد مطالعه، چهار عامل متشکل از تعدادی از کانیه‌ها که با یکدیگر ارتباط ژنتیکی خاصی داشته و می‌توانند مرتبط با محیط‌های زمین‌شیمیایی خاص و یا نوع خاصی از کانی‌سازی باشند، به شرح زیر انتخاب شد:

الف- عامل اول (F1): متشکل از کانیه‌های گوتیت، آخری، پیریت هوازده و لیمونیت؛



شکل ۵. مهم‌ترین کانیه‌های مشاهده شده در بخش کانی سنگین در منطقه مورد مطالعه؛ الف: پیروکسن، ب: روتیل، پ: طلا، ت: ولفنیت [$PbMoO_4$]، ث: آپاتیت [$Ca_5(Fe, OH, Cl)(PO_4, CO_3)_3$]، ج: لوکوکسن (محصول دگرسانی اکسیدهای آهن - تیتانیوم)، چ: اپیدوت [$Ca_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3OH$]، ح: نیگرین (درهم‌رشدی روتیل و ایلمنیت)



شکل ۶. دسته‌بندی خوشه‌ای بهینه برای کانیهای مورد مطالعه.

محاسبه شد [۲۱]. بنابراین با استفاده از نرم افزار SPSS 16.0 چارک‌های اول (معادل ۲۵ درصد)، دوم (معادل ۵۰ درصد) و سوم (معادل ۷۵ درصد) مقادیر فراوانی هر چهار عامل انتخابی محاسبه شده و تعداد نمونه‌هایی که در چارک‌های فوق قرار می‌گیرند، برآورد شد (جدول ۴).

نحوه محاسبه ناهنجاریهای کانی سنگین به دلیل ماهیت خاص داده‌ها و عدم پیوستگی موجود در آنها، با روشی که در مورد داده‌های زمین‌شیمیایی بیان شده متفاوت است. ناهنجاریهای داده‌های کانی سنگین در منطقه مورد مطالعه، بر اساس مقادیر ۲۵ درصد، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد فراوانی اعداد هر عامل

جدول ۴. ناهنجاریهای محاسبه شده برای عاملهای مورد بررسی.

متغیر	ناهنجاری درجه ۳	ناهنجاری درجه ۱	ناهنجاری درجه ۱
عامل اول	۲	۲	۱
عامل دوم	۲	۲	۱
عامل سوم	۲	۲	۱
عامل چهارم	۲	۲	۱

مربوط به عامل اول معرف مناطقی است که دارای دگرسانیهای اکسید آهن است. بنابراین فرآیند اکسیداسیون بازالت‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با توجه به شرایط محیطی و آب و هوایی دور از انتظار نیست. ناهنجاریهای مربوط به عامل دوم

قابل ذکر است که مقادیر بیشتر از چارک سوم به عنوان ناهنجاری درجه ۱، مقادیر بیشتر از چارک دوم به عنوان ناهنجاری درجه ۲ و مقادیر بیشتر از چارک اول به عنوان ناهنجاری درجه ۳ در نظر گرفته شده است. ناهنجاریهای

گردید. منشأ کانیهای فوق، عمدتاً مناطق دگرسانی و مناطق با کانی‌سازیهی رگه‌ای و پراکنده است. با توجه به نتایج آنالیز خوشه‌ای، ارتباط معنی‌داری بین کانیهای طلا، کانیهای تیتان‌دار و اکسیدهای آهن وجود دارد. مقدار طلا در سنگهای مافیک به طور قابل ملاحظه‌ای، در ارتباط با موقعیت جغرافیایی و محیط تکنونیکي آنهاست [۲۴]. از طرفی با توجه به این‌که عیار زمینه طلا و همچنین تیتان در سنگهای مافیک و الترامافیک بالاتر از دیگر سنگهاست (مقدار TiO_2 در سنگهای بازالتی ۱/۵-۲/۷ درصد [۲۵] و مقدار طلا از ۰/۳ ppb تا ۹/۵ppb متغیر بوده و به طور متوسط ۳/۶ ppb می‌باشد [۲۶])، بنابراین حضور طلا و تیتان در رسوبات، حکایت از شست‌وشوی واحدهای بازالتی در منطقه دارد. کانیهای اکسید تیتانیوم نیز که مقاومت زیادی در مقابل فرآیند هوازدگی و انتقال داشته‌اند، با توجه به محیط ته‌نشینی مناسب، تجمع یافته‌اند. بر اساس آنالیز خوشه‌ای انجام شده برای داده‌های مربوط به نمونه‌های کانی سنگین، احتمال وجود دو نوع کانی‌سازی (طلا و تیتان) در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. نتایج حاصل از انطباق نقشه ناهنجاریهای زمین‌شیمیایی مشاهده شده با نقشه ضریب خطوارگی منطقه مورد مطالعه نشان داد که ناهنجاریهای مشاهده شده منطبق بر مناطق با چگالی بالای شکستگیها می‌باشد، لذا در بوجود آمدن ناهنجاریهای فوق، احتمالاً شکستگیها و گسلها نقش بسیار مؤثری ایفا کرده‌اند و شکل‌گیری و گذر آبراهه‌ها از چنین سنگهای خرد شده‌ای که زمینه نسبتاً بالایی از عناصر فوق را داشته‌اند می‌توانسته رسوباتی با مقادیر غیرعادی از عناصر کانه‌ساز و کانیهای مربوطه را بر جای گذاشته باشد. از این رو مناطق با شکستگی بالا از اهمیت اکتشافی بالایی برخوردارند (شکل ۷). کانی‌سازی گزارش شده در سنگهای آتشفشانی سلطان میدان بیشتر از نوع سولفیدی (کالکوپیریت، پیریت و کانیهای اکسیدی و کربناتی مس و آهن ناشی از هوازدگی و اکسیداسیون سطحی آنها) و اکسیدی (مگنتیت و روتیل) بوده است [۷ و ۱۱]. در نتیجه می‌توان بروز ناهنجاریهای مشاهده شده در منطقه را ناشی از فروروشی عناصر از کانیهای فوق در نظر گرفت که علاوه بر مس و آهن، می‌توانسته‌اند طبق قوانین زمین‌شیمیایی جاننشینی عناصر، عناصر گوگرددوست و اکسیژن‌دوست دیگری را نیز در ساختار خود جای داده باشند.

می‌تواند معرف کانی‌سازی طلا در منطقه باشد. ناهنجاریهای مربوط به عامل سوم معرف مناطقی است که دارای دگرسانی اکسیدهای آهن است. در نهایت، با توجه به نقشه‌های رسم شده برای عوامل انتخابی، نمونه شماره ۴ که در ۲ کیلومتری شمال غربی روستای قلعه نوخرقان واقع شده است، برای مقادیر عاملهای دوم و سوم ناهنجاری درجه ۱ نشان می‌دهد که می‌تواند معرف کانی‌سازی تیتان و طلا همراه با اکسیدهای آهن باشد.

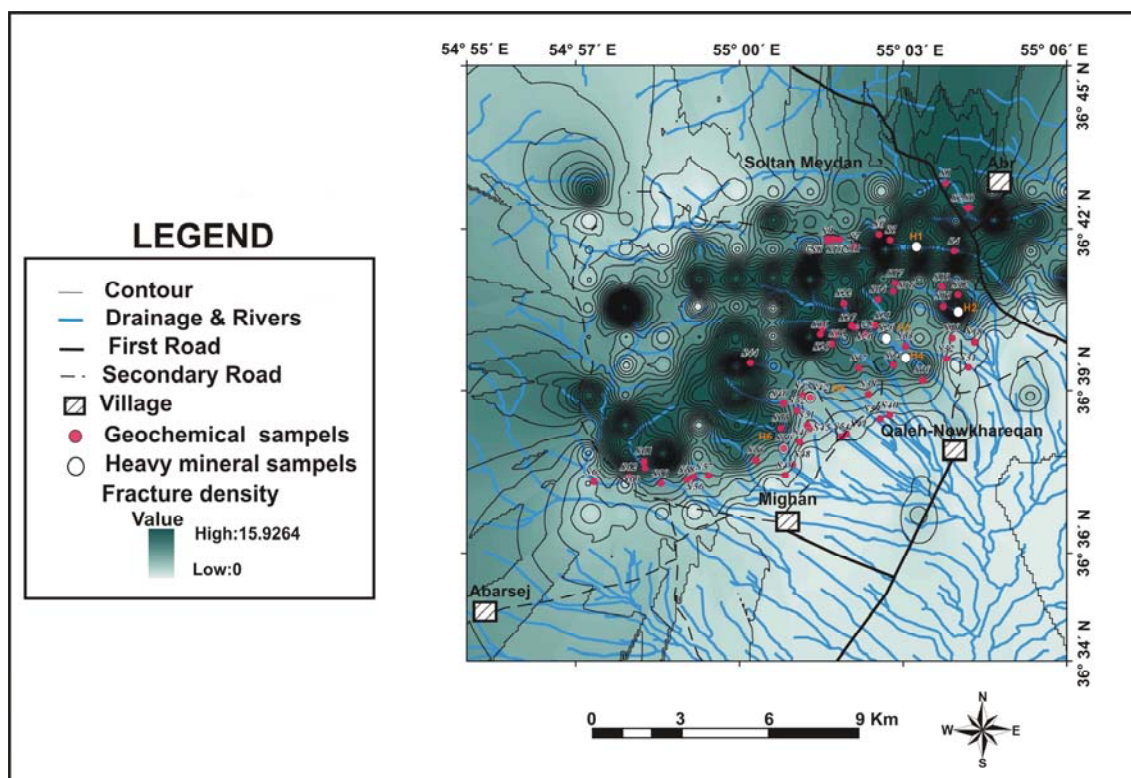
بحث و نتیجه‌گیری

تلفیق نتایج حاصل از پردازش داده‌های زمین‌شیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، مطالعات کانیهای سنگین و محاسبه ضریب خطوارگی تصویری در مجموع ۵ محدوده به عنوان ناهنجاریهای نهایی عناصر را معرفی می‌نماید شکل (۷) که به شرح زیر برای اکتشافات آتی اولویت‌بندی می‌شوند:

اولویت اول: محدوده ناهنجاریهای A1 و A2

اولویت دوم: محدوده ناهنجاریهای A3، A4 و A5

بیشترین گسترش این ناهنجاریها در درجه اول مربوط به محدوده A2 (معرف ناهنجاریهای سرب، روی و کبالت) و در درجه دوم مربوط به محدوده A1 (معرف ناهنجاریهای نیکل، مس، روی، آهن و منگنز) می‌باشد. سنگ بالادست محدوده ناهنجاریهای فوق متشکل از بازالت پورفیری، آندزیت، توف (سازند سلطان میدان)، ماسه‌سنگ کوارتزی با کنگلومرای قاعده (سازند پادها) و آهک دولومیتی، مارن، توف (سازند خوش‌بیلاق) است. در بین عناصر مورد بررسی، فقط عناصر مس و نیکل دارای ناهنجاری درجه ۱ می‌باشند. با عنایت به مقدار زمینه بالای مس در تشکیلات بازالتی، موقعیت زمین‌ساختی منطقه که احتمالاً یک کافت درون‌قاره‌ای است [۱۱ و ۲۲] و با توجه به این‌که کانی‌سازی مس در بازالت‌های شکل گرفته در این محیطها به اثبات رسیده (مانند کانه‌سازی مس خالص در بازالت‌های حفره‌ای و برشی به سن پرموتریاس در روسیه و کانی‌سازی مس خالص، کالکوسیت و مالاکیت در بازالت‌های حفره‌ای به سن ژوراسیک- کرتاسه در برزیل [۲۳])، احتمال کانی‌سازی مس در تشکیلات بازالتی سلطان میدان نیز وجود دارد. نتایج حاصل از مطالعه کانیهای سنگین، باعث شناسایی کانیهای سنگ‌ساز (مگنتیت، آپاتیت، روتیل، گارنت، پیروکسن، آمفیبول، اپیدوت و کلریت) و کانیهای مرتبط با نهشته‌های کانی‌ساز (لیمونیت، گوتیت، همتایت، باریت، پیریت)



شکل ۷. نقشه هم‌تراز ضرب خط‌وارگی در منطقه مورد مطالعه و انطباق محدوده‌های واجد ناهنجاریهای زمین‌شیمیایی شناسایی شده بر مناطق با چگالی بالای شکستگی.

قدردانی

از واحد آزمایشگاههای سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور که مراحل آماده‌سازی و مطالعه کانیهای سنگین را به انجام رسانده‌اند و همچنین از آزمایشگاه مرکزی مجتمع مس سرچشمه که آنالیز شیمیایی عناصر را در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای انجام دادند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

and Soltan Maidan Formations) in the Khoshyeilagh area, eastern Alborz Range, northern Iran; stratigraphic and palaeogeographic implications", *Review of Palaeobotany and Palynology* 164 (2011) 251-271.

[۶] وهاب‌زاده ق.، "طرح پی‌جویی و پتانسیل‌یابی مواد معدنی در سازند آتشفشانی نکارمن"، اداره کل سازمان صنایع و معادن استان گلستان، گرگان (۱۳۷۷) ۹۴ ص.

[7] Lotfi M., Mir Mohammad Sadeghi M., Omrani S. J., "Mineral Distribution Map of Iran (Scale: 1: 100000)" *Geol. Surv, Iran* (1993).

[8] زمانی‌پدرام م.، کریمی ه.، ر.، "نقشه زمین‌شناسی چهار گوش ۱:۱۰۰۰۰۰ علی‌آباد"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران (۱۳۸۵).

[۹] جعفریان م.، ب.، جلالی ع.، "نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ خوش‌بیلاق"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران (۱۳۸۳).

[10] Mehdizadeh Shahri H., "Pre-rifting evidence of Paleotethys in the southwest of Shahrood, northeastern Iran", *World Applied Sciences Journal* 3 (2008) 54-161.

[۱] یزدی م.، "روشهای مرسوم در اکتشافات زمین‌شیمیایی"،

انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (۱۳۸۱) ۱۸۹ ص.

[2] Solovov A. P., "Geochemical Prospecting", Mir Publisher, Moscow (1987) 157-280.

[3] Jenny J. G., "stratigraphy de l Elburz oriental entre Aliabad et shahrood, Iran", *PhD. Thesis Geneve* (1977) 320.

[۴] شهرابی م.، "نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران (۱۳۶۹).

[5] Ghavidel-Syooki M., Hassanzadeh J., Vecoli M., "Palynology and isotope geochronology of the Upper Ordovician-Silurian successions (Ghelli

- representation", *Economic Geology* 64 (1969) 538-550.
- [19] Hawkes H. E., Webb J. S., "*Geochemical in mineral exploration harper and row*", New York (1962) 415p.
- [۲۰] آرم ف.، "کاربرد علمی و اقتصادی و نحوه مطالعه کمی و کیفی کانیهای سنگین"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۷ ص.
- [۲۱] فضائی ع. ر.، "اکتشافات ژئوشیمیایی-کانی سنگین نیمه تفصیلی در منطقه معلمان (جنوب شرق دامغان)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران (۱۳۷۷) ۱۸۸ ص.
- [۲۲] حسینا ل.، رسا ا.، نظام‌پور م. ه.، "خصوصیات ژئوشیمیایی و پتروگرافی بازالت‌های سلطان میدان به عنوان میزبان کانه‌زایی مس (شمال غرب- شمال شرق شهرستان شاهرود)"، نوزدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه گلستان (۱۳۹۰) ۶ ص.
- [23] Mitchell A. H. G., Garson M. S., "*Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*", Academic Press, London (1981) 405.
- [۲۴] حسنی‌پاک ع. ا.، "ژئوشیمی اکتشافی (محیط سنگی)"، انتشارات دانشگاه هرمزگان (۱۳۸۶) ۲۷۴ ص.
- [25] Force E. R., "*Geology of Titanium Mineral Deposits*", Geological Society of America Special Paper (1991) 112.
- [26] Romberger S. B., "*Geochemistry of gold in hydrothermal deposits*", U.S. Geological Survey Bulletin A1-A8 (1990).
- [۱۱] جعفریان ع.، "نقش بازالت‌های زیردریایی سیلورین در کانی‌سازی ماسیوسولفاید در ارتفاعات شمال‌شرق شاهرود"، مجله زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۳ (۱۳۸۶) ص ۱۵۷-۱۶۹.
- [12] Abrams M. H., Ramachandran B., "*Aster user Hand book version 2.jet propulsion Laboratory*", 4800 oak Grove Dr. Pasadena CA91109 (2004).
- [13] Hardcastle K. C., "*Photolineament Factor: A new computer-aided method for remotely sensing the degree to which bedrock is fractured*", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (1995) 739- 747.
- [۱۴] هنرمند م.، رنجبر ح. ا.، "کاربرد روشهای پردازش تصویر روی داده‌های ETM^+ به منظور اکتشاف کانسارهای مس نوع پورفیری و رگه‌ای در منطقه مزار-کوه‌پنج در استان کرمان"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۷ (۱۳۸۲) ص ۱۱۰-۱۲۷.
- [۱۵] حسنی‌پاک ع. ا.، شرف‌الدین م.، "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۸۰) ۹۸۷ ص.
- [۱۶] سبحانی‌درگاه ح.، "اکتشافات ژئوشیمیایی-کانی سنگین در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مهدی‌آباد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۱۶۳ ص.
- [۱۷] صادقی ب.، "اکتشاف ژئوشیمیایی سیستماتیک و بررسی‌های کانه‌زایی در منطقه کوه خشومی واقع در جنوب غرب ساغند (استان یزد)"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳) ۱۷۹ ص.
- [18] Lepeltier C., "*A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical*