



ژئوشیمی، کانه‌نگاری و توزیع عناصر خاکی کمیاب در گوسان‌های مرتبط با نهشته‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد

مطالعه موردی: قلعه ریگی، جنوب غرب جیرفت، جنوب ایران

حجت‌الله جهانگیری^۱، سعید سعادت^{۲*}، سید احمد مظاهری^۱، محمدرضا حیدریان شهری^۱، محمد فودازی^۳ و جعفر عمرانی^۴

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی و مهندسی نفت، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(۳) گروه زمین‌شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

(۴) سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

چکیده

محدوده قلعه ریگی در استان کرمان و جنوب غرب جیرفت قرار گرفته است. کانه‌زایی در این محدوده به صورت چینه‌سان در یک توالی آتشفشانی- رسوبی به سن ژوراسیک میانی- کرتاسه آغازین دیده می‌شود. هوازدگی سطحی زون‌های کانه‌دار موجب شده بخش اعظم سولفیدهای اولیه به اکسید و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده و گوسان تشکیل شود. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و الکترونی، کانی‌های هماتیت، گوتیت، کوارتز و گروه ژاروسیت (نظیر ناتروژاروسیت و ژاروسیت) شناسایی شدند. نتایج تجزیه شیمیایی، بیانگر حضور مقادیر متوسط طلا (۱/۶ گرم در تن)، نقره (۲۰ گرم در تن)، آرسنیک (۰/۱۱ درصدوزنی)، آنتیموان (۵۸ گرم در تن)، مس (۰/۲۹ درصد وزنی)، سرب (۲۲۱۰ گرم در تن) و روی (۴۹۷ گرم در تن) در افق‌های مختلف گوسان است. جایگاه زمین‌شناختی، الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب^۱ و غنی‌شدگی هرچند اندک؛ ولی مثبت Eu و زون‌بندی عناصر کانه‌ساز، گوسان‌های مورد بررسی را در دسته گوسان‌های غنی از طلا، بالغ و بارور مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: گوسان، سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، ژئوشیمی، عناصر خاکی کمیاب، جیرفت، ایران

مقدمه

گوسان مجموعه‌ای از اکسید و هیدروکسیدهای آهن است که در اثر هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی در نزدیکی سطح زمین تشکیل می‌شوند. در این فرایند، آب‌های سطحی عناصر حل‌شدنی را شسته و اکسید و هیدروکسیدهای آهن ثانویه (گوتیت، هماتیت) و اکسی سولفات‌ها (کانی‌های مربوط به گروه ژاروسیت) نزدیک ذخیره سولفید توده‌ای تشکیل می‌شوند (Andrew, 1980; Boyle, 1996; Andrew, 2000). به همین دلیل، وجود گوسان‌ها در سطح می‌تواند برای اکتشاف ذخایر سولفیدی در عمق بسیار مفید باشد (Wilhelm and Kosakevitch, 1979; Andrew, 2000). همچنین ذخایر کانی‌های قیمتی نظیر فیروزه نیز بر اهمیت توجه به گوسان‌ها تأکید شده است (Karimpour et al., 2012). از آنجایی که گوسان‌ها دارای مقادیر زیادی اکسید آهن هستند، در تصاویر ماهواره‌ای از بارزسازی کانی‌های آنها برای اکتشاف ذخایر سولفیدی به خوبی استفاده شده است (Essalhi et al., 2011; Rajendran and Nasir, 2017; Gahlan and Ghrefat, 2018). کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در دوره‌های زمانی و پهنه‌های ساختاری مختلف شکل گرفته‌اند. بر اساس پژوهش‌های تاشی و همکاران (Tashi et al., 2017) و بدرزاده و همکاران (Badrzadeh et al., 2010)، مهم‌ترین زمان رخداد انواع مختلف این ذخایر در ایران، ژوراسیک و کرتاسه است و از نظر جایگاه زمین‌ساختی این ذخایر اغلب منسوب به محیط‌های کمانی و فرافورانش هستند. بخش جنوبی پهنه سنندج - سیرجان، به عنوان میزبان بزرگ‌ترین و بیشترین ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در ایران گزارش شده است (Mousivand et al., 2018). در بخش‌هایی از این پهنه در جنوب و جنوب غرب جیرفت، کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در مناطقی نظیر دره بید، سیاه معدن رزتاقوک و سورگاه شناسایی شده‌اند و در مواردی مورد بهره‌برداری نیز قرار گرفته‌اند. ذخیره سولفید توده‌ای مس - روی سرگز (نوع بایمودال مافیک، تریاس - ژوراسیک) در مجاورت منطقه مورد بررسی، به‌طور متوسط دارای ۳ میلیون تن ذخیره با عیار ۱/۳۴

درصد مس، ۰/۳۸ درصد روی، ۰/۰۸ درصد سرب، ۰/۲۴ گرم در تن طلا و ۷ گرم در تن نقره است (Badrzadeh et al., 2010).

محدوده معدنی قلعه ریگی که در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب غرب جیرفت قرار دارد، از لحاظ دارا بودن شواهد کانه‌زایی و آثار فعالیت‌های معدن کاری قدیمی، از پتانسیل فلزی مناسبی برخوردار است که فعالیت‌های معدنی در آن به عهد باستان برمی‌گردد. در بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، در حین کنترل محدوده‌های امیدبخش در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفندقه (Shahraki Ghadimi, 2003)، محدوده قدیمی قلعه ریگی گزارش شده است. در عملیات پی‌جویی محور سرگز، بیش از ۱۵ نشانه معدنی معرفی شده و طی بازدید از کانه‌زایی‌های مس منطقه، محدوده مورد بررسی برای اکتشافات نیمه تفصیلی پیشنهاد شده است (Mousivand and Dowlatkhah, 2006). بررسی‌های زمین‌شناسی و دگرسانی در کانسار قلعه ریگی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ انجام شده است (Borna, 2008).

هدف اصلی این پژوهش، بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی گوسان‌های این منطقه است که به صورت تجمعی از اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن در بخش‌هایی از منطقه قابل مشاهده هستند. در این پژوهش، علاوه بر بررسی‌های کانه‌نگاری، مقادیر عناصر با ارزش نظیر طلا، نقره، سرب، روی و مس در افق‌های مختلف گوسان‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین نحوه توزیع عناصر کمیاب خاکی در این افق‌ها با نمونه‌های گوسان مرتبط با ذخایر شناخته شده جهانی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند در راستای انجام اکتشافات تفصیلی و کمک به ارائه مدل‌های کانی‌سازی در اکتشاف ذخایر پنهان سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در مقیاس ناحیه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌شناسی و طبقه‌بندی گوسان‌ها

طبقه‌بندی‌های مختلفی برای تشریح سنگ‌های هوازده آهن‌دار

گوسان‌های بارور و زون‌های برون‌زاد همراه، به عنوان منابع فلزات حائز اهمیت هستند و برای عناصری مانند مس، سرب، طلا و نقره مورد توجه بوده‌اند (Boyle, 1996). گوسان‌های ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، از لحاظ حضور فلزات گران‌بها به صورت ذرات طلا، الکتروم و انواع کانه‌های نقره می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار مهم باشد (Boyle, 1996). به عنوان مثال، در بخش گوسان کانسار Canatuan (فیلیپین)، محتوای طلا به صورت الکتروم، ۴۵ درصد افزایش یافته است (Sherlock and Barrett, 2004). غنی‌سازی ۲ تا ۸/۵ برابری عناصر طلا و نقره در گوسان‌های تعدادی از ذخایر سولفید توده‌ای کانادا نیز گزارش شده است (Boyle, 1996). بررسی‌های مربوط به کانی‌سازی کنونی در بستر دریاها نیز، غنی‌سازی طلا در زون‌های اکسیده شده ذخایر سولفید توده‌ای را نشان می‌دهد (Hannington et al., 1988; Törmänen and Koski, 2005).

رنگ صحرائی گوسان‌ها اغلب به ترکیب اکسید و هیدروکسیدها مرتبط بوده و کم‌وبیش در اثر عواملی چون میزان جذب آب، اندازه دانه‌ها، میزان فشردگی و وجود پوشش‌های سطحی است. به‌طور کلی، گوتیت رنگ‌های زرد-قهوه‌ای، هماتیت رنگ قرمز آجری، منگنز رنگ سیاه، زاروسیت رنگ زرد یا قهوه‌ای، گالن رنگ سیاه، حضور مالاکیت و کانی‌های نقره‌دار رنگ‌های سبز و آبی تولید می‌کند.

کانی‌شناسی: فرایند تشکیل گوسان با اکسیدشدن پیریت و سایر سولفیدها آغاز و به تشکیل اکسید و هیدروکسیدهای آهن به همراه اسید سولفوریک منجر می‌شود. محصول اولیه هوازگی به‌طور معمول یک هیدروکسید آهن آمورف به صورت $\text{Fe}(\text{OH})_3$ است که به تدریج به گوتیت و یا هماتیت تبدیل می‌شود. در برخی از گروه‌های سنگی، هیدروکسیدهای آهن تا ۹۰ درصد از حجم سنگ را تشکیل داده‌اند. در بین

نزدیک سطح زمین توسط ویلمزهرست و فیشر (Wilmschurst and Fisher, 1983) و تیلور (Taylor, 1987) ارائه شده است. برخی تعریف‌ها بر مبنای محتوای آهن و یا سولفید ارائه شده است. به‌طور مثال واژه گوسان به محصول اکسید شده ذخیره سولفیدی که بیش از ۲۰ درصد کانی‌های سولفیدی دارد، محدود شده است (Blanchard, 1968).

هانت (Hunt, 1977) گوسان را به دو دسته سنگ‌های گوسان خاکی^۱ و فری‌کریتی^۲ تقسیم‌بندی کرد. بر پایه این تعریف‌ها، سنگ‌های فری‌کریتی، سنگ‌های تیره‌رنگی هستند که از هماتیت، گوتیت، ناتروژاروسیت تشکیل شده و در بالای سنگ‌های گوسانی قرار می‌گیرند و سنگ‌های گوسان خاکی دقیقاً در زیر سنگ‌های فری‌کریتی قرار گرفته و از هماتیت، گوتیت، ناتروژاروسیت و زاروسیت تشکیل شده‌اند.

بعضی از پژوهشگران، گوسان‌ها را به گروه‌های سولفید فلزات پایه، گوسان‌های سولفید آهن (که گاهی گوسان‌های نازا خوانده می‌شوند)، گوسان‌های فیسیلی (که ممکن است مربوط به ذخایر سولفید باشند و یا اینکه در هوازگی‌های دور قبلی تشکیل شده و بعد توسط نهشته‌های رسوبی یا آتشفشانی دفن شده‌اند) و گوسان‌های حمل شده یا نابرجا تقسیم‌بندی کرده‌اند (Blain and Andrew, 1977; Taylor, 1987). دیگر پوشش‌های آهن‌دار به عنوان کلاهِک‌های آهنی نام برده شده‌اند (Wilhelm and Kosakevitch, 1979; Blanchard, 1968). آنها کم‌وبیش شبیه به گوسان‌ها هستند و می‌توان آنها را گوسان کاذب یا شبه گوسان نامید.

گوسان‌ها را بر مبنای ارزش اقتصادی، رنگ و دیگر مؤلفه‌ها تقسیم‌بندی می‌کنند. گوسان نازا^۳، گوسان‌هایی هستند که از اکسیدشدن سولفیدها به وجود آمده؛ ولی فاقد عناصر با ارزش هستند. این گوسان‌ها اغلب دارای پیریت و پیروتیت هستند. در مقابل، گوسان‌هایی که دارای عناصر با ارزش بوده، گوسان‌های بارور معرفی شده‌اند (Wilmschurst and Fisher, 1983).

1. Earthy gossan

2. Ferricrete

3. Barran gossan

فرایند اکسایش است (Scott et al., 2001).

زمین‌شناسی محدوده

محدوده قلعه ریگی در زون ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است (شکل ۱-۱). قدیمی‌ترین واحد سنگی رخنمون‌یافته در محدوده قلعه ریگی، واحد آتشفشانی توف (J^{CVT}) منسوب به ژوراسیک است که در شمال محدوده رخنمون دارد (شکل ۱-۱). از لحاظ زمین‌ریختی، این واحد نرم‌فرسا بوده و دارای شیب توپوگرافی ملایمی است (شکل ۲-۱). لایه‌بندی ظریف، منظم و چین‌خوردگی ملایم از دیگر ویژگی‌های این واحد است. واحد سنگی که در نقشه (شکل ۱) با عنوان رسوبات پلاژیک همراه با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌های مافیک (J^{Ips}) نام‌گذاری شده است و در بخش شرقی محدوده رخنمون زیادی دارد، از رسوبات مناطق عمیق شامل گل‌سنگ، شیل، ماسه‌سنگ آرکوزی و لایه‌های ظریف و منظم چرت‌های رادیولاریتی همراه میان‌لایه‌های منفصل، پراکنده و عدسی‌شکل گدازه‌های بالشی تشکیل شده است (شکل ۲-۱). رنگ صحرایی این مجموعه سنگی اغلب سبز کم‌رنگ (زیتونی) تا سبز تیره است. از لحاظ حجمی، ضخامت بخش رسوبی به مراتب بیشتر از بخش گدازه‌ای بوده و همان‌طور که اشاره شد، بخش گدازه‌ای به صورت میان‌لایه‌های پراکنده، و منفصل در پیکره رسوبی قابل مشاهده است. شکل و ابعاد گدازه‌های بالشی در بخش‌های مختلف این واحد متغیر بوده و دارای سطح مقطع دایره‌ای، بیضوی و یا نامنظم هستند (شکل ۲-۱).

واحد آتشفشانی- رسوبی (J^{Ivs})، اغلب از گدازه‌های بالشی، جریان‌های بازالتی و سیل‌های میکروگابرویی به همراه میان‌لایه‌های منظم، کم ضخامت، ظریف و متناوب از رسوبات پلاژیک مناطق عمیق تشکیل شده است (شکل ۲-۱). بیشترین رخنمون این واحد در بخش غربی محدوده مورد بررسی است (شکل ۱-۱). روند عمومی واحدها معمولاً شمال- شمال‌غرب، جنوب- جنوب‌شرق و شیب آنها حدود ۳۵ درجه در جهت

کانی‌های سولفیدی، پیریت مشخص‌ترین ساختمان‌های باقی‌مانده را به وجود می‌آورد و شکل‌های مکعبی این کانی در گوسان‌ها حفظ می‌شود. جایگزینی مستقیم پیریت توسط گوتیت، بدون اضافه‌شدن آهن از خارج، به کاهش ۱۳ درصدی حجم کل سنگ منجر می‌شود. این کاهش حجم می‌تواند به صورت متخلخل در داخل گوتیت یا به صورت حفره‌هایی در شکل کاذب نمایان شود (Boudeulle and Muller, 1988). سایر کانی‌ها هماتیت، لیمونیت، پیروتیت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، انگلزیت، سروزیت، پیرومورفیت، تتراهدردیت غنی از نقره، تنانتیت، آرسنوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، مولیبدنیت، مگنتیت، ایلمنیت، ژاروسیت، ژیپس، کانی‌های کربناتی، کانی‌های رسی و سیلیس هستند.

ساختمان‌های میکروسکوپی: هوازدگی کانی‌های سولفیدی و تشکیل گوسان، گاهی اوقات به تشکیل ساختارهایی مانند باقی‌مانده، منطقه‌بندی، شبکه‌ای و داربستی منجر می‌شود که می‌تواند در تشخیص گوسان و کانی‌شناسی سولفیدهای اولیه کمک کند. شرایط ایده‌آل برای حفظ مناسب ساختمان‌ها عبارتند از وجود سولفیدهای دانه درشت و خودشکل و pH نسبتاً بالا در مراحل اولیه فرایند اکسایش.

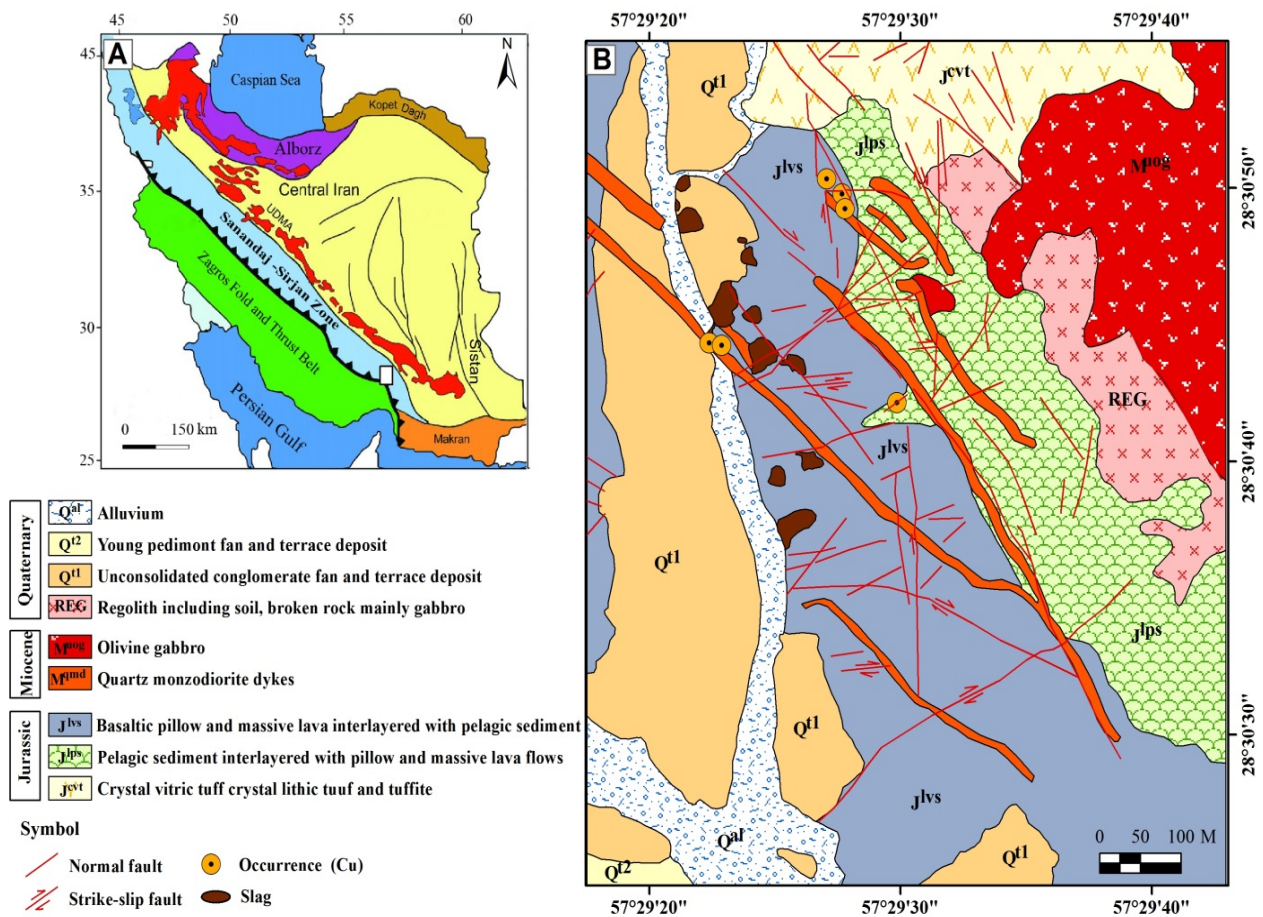
منطقه‌بندی: معمولاً گوسان‌های بالغ^۱ منطقه‌بندی عمودی خوبی را نشان می‌دهند که از بالا به پایین شامل زون هماتیت- گوتیت و سولفات‌های غنی از آهن ثانویه (به طور عمده گروه ژاروسیت)، گاهی اوقات مناطق حاوی کربنات‌ها و فسفات‌های ثانویه و یک منطقه عمیق‌تر از سولفیدهای برون‌زاد است (Boyle, 2003). گوسان‌های بالغ دارای سنگ‌های قهوه‌ای تیره با بافت جعبه‌ای و همراه با برش- کنگلومراهای لایه‌ای هستند. از طرف دیگر، گوسان‌های نابالغ^۲ منطقه‌بندی ناقصی دارند که می‌تواند حاوی سولفات‌های غنی از فلز و حتی بقایای سولفیدهای اولیه باشد. بنابراین، "بلوغ گوسان" بازتاب پیشرفت

1. Mature

2. Immature

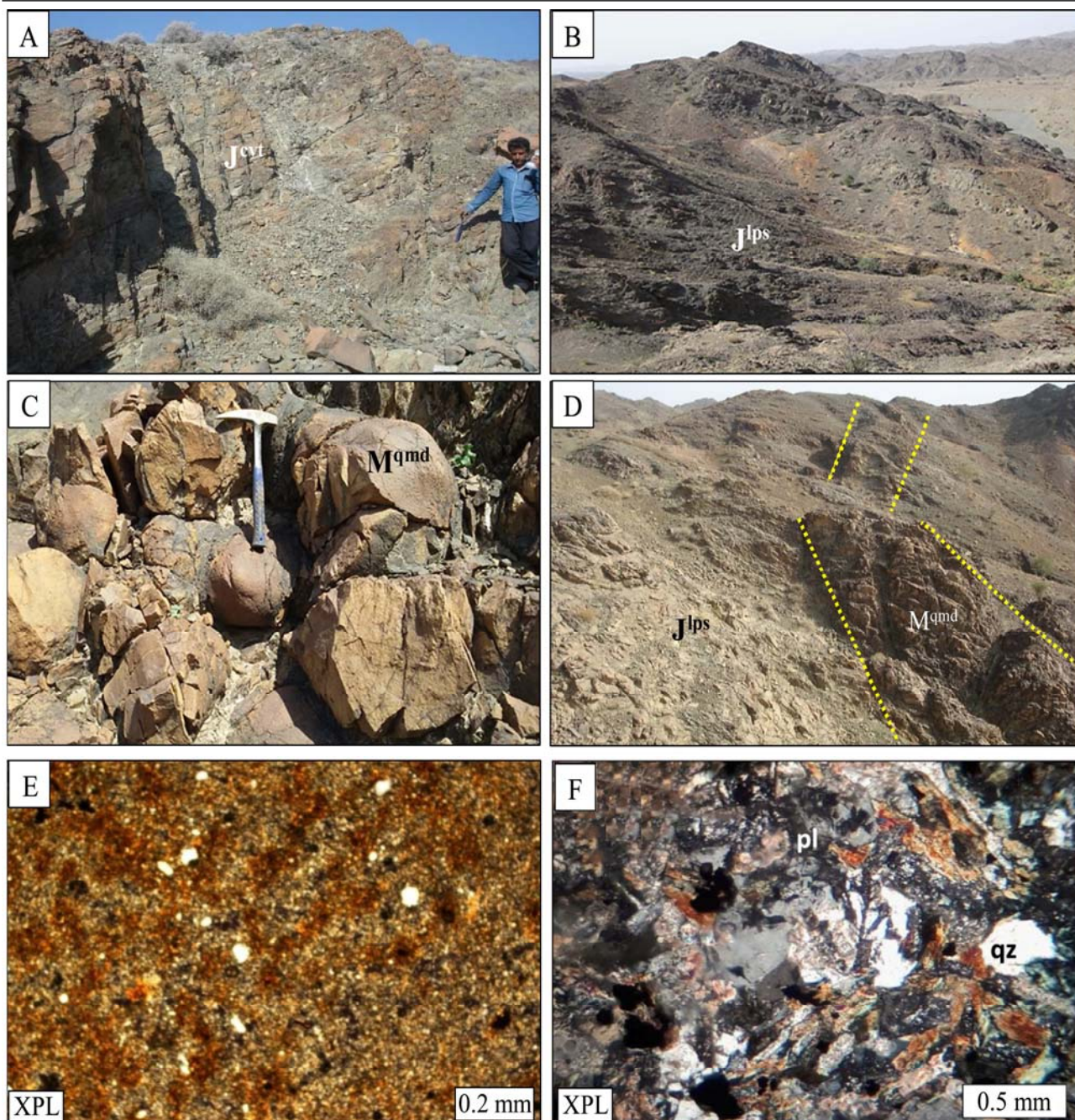
جنوب غرب است. در محدوده مورد بررسی، تعداد زیادی دایک‌های طولانی و موازی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق (M^{qmd}) دیده می‌شوند که واحدهای قدیمی‌تر از خود را قطع کرده‌اند (شکل ۱). ترکیب سنگ‌شناسی این دایک‌ها اغلب دیوریت، گابرو دیوریت و یا مونزودیوریت است (شکل ۲-۲). طول دایک‌ها از چندین متر تا بیش از یک کیلومتر و پهنای آنها از چند متر تا بیش از بیست متر متغیر است (شکل ۲-۲). رخنمون واحد الیون گابرو

در ارتفاعات شرق و شمال شرق محدوده مشاهده می‌شود. توده‌های یادشده جوان‌ترین فعالیت ماگمایی در محدوده مورد بررسی بوده که تمام واحدهای قبل از خود را قطع کرده‌اند. واحدهای منسوب به سنوزوئیک شامل زیر واحد رگولیتی (REG) است که بیشتر از قطعات و بلوک‌های واحد گابروی، تراس‌های آبرفتی قدیمی (Q^{l1}) و (Q^{l2}) و رسوبات فصلی آبراهه‌ای (Q^{al}) هستند (شکل ۱).



شکل ۱. A: موقعیت منطقه قلعه ریگی در نقشه پهنه‌های ساختاری ایران با تغییرات پس از آگارد و همکاران (Agard et al., 2011) و B: نقشه زمین‌شناسی منطقه قلعه ریگی

Fig. 1. A: Location of Ghaleh Rigi area in the structural map of Iran (after agard et al., 2011), and B: Geological map of Ghaleh Rigi area



شکل ۲. واحدهای سنگی منطقه قلعه ریگی A: لایه‌بندی منظم واحد کریستال ویتریک توف (J^{cv})، دید به سمت شمال، B: واحد پلاژیک شامل لایه‌های ظریف و منظم گلسنگ، شیل، ماسه‌سنگ و میان‌لایه‌های گدازه‌های بالشی (J^{ps})، دید به سمت جنوب، C: گدازه‌های بالشی، D: دایک‌های مافیک (M^{qmd}) دید به سمت غرب، E: مقطع میکروسکوپی از گلسنگ‌های سیلتی دانه‌ریز همراه با اکسیدهای آهن و F: مقطع میکروسکوپی از دایک کوارتز مونزودایوریتی. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (pl: پلاژیوکلاز، qz: کوارتز).

Fig. 2. Rock units from the Ghaleh Rigi area A: Regular layering of vitric crystal tuff unit (J^{cv}), view to north, B: Pelagic sediment including thin layer of mudstone, shale, sandstone and interlayers of pillow lavas (J^{ps}), view to south, C: Pillow lavas, D: mafic dykes (M^{qmd}), view to west, E: Microscopic section of fine-grained silty mudstone with iron oxides, and F: Microscopic section of quartz monzodiorite dyke. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (pl: Plagioclase, qz: Quartz).

روش مطالعه

طی بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد بررسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شد (شکل ۱). برای بررسی کانه‌های فلزی و باطله، بافت و نحوه توزیع کانی‌ها، ۲۰ نمونه مقطع نازک و صیقلی در سازمان زمین‌شناسی کشور (مرکز تهران) آماده‌سازی و بررسی شد. برای بررسی‌های ژئوشیمیایی، تعداد ۱۵ نمونه عمود بر روند افق گوسان برداشت شد. همچنین برای مقایسه گوسان‌ها با دیگر شواهد سطحی از ۶ رخنمون مربوط به سرباره و یا محل دپوی مجاور حفاری‌های قدیمی نمونه خردسنگی برداشت شد. نمونه‌ها پس از خردایش، تا حد ۲۰۰ مش نرمایش و آماده‌سازی شدند. نمونه‌های پودر شده برای تجزیه ۳۴ عنصری به روش AES-ICP (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مرکز تهران) و برای بررسی غلظت عناصر کمیاب خاکی به روش ICP-MS به آزمایشگاه ارسال شدند. برای شناسایی انواع کانی‌ها و به‌ویژه رس‌ها، ۳۰ نمونه پودری برای بررسی کانی‌شناسی با روش طیف‌سنج پراش پرتو ایکس^۱ انتخاب و در سازمان‌های زمین‌شناسی مراکز تهران، تبریز و کرج مورد آزمایش قرار گرفت. پس از بررسی‌های دقیق کانه‌نگاری، ۳۰ نمونه حاوی کانی یا کانه‌های مناسب برای بررسی‌های میکروسکوپ روبشی^۲، تعیین و محل‌های مناسب برای تجزیه در مقاطع مشخص و در آزمایشگاه مرکز پژوهش‌های کاربردی کرج وابسته به سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد.

شواهد کانی‌سازی در منطقه

سابقه فعالیت‌های معدنی در این منطقه به گذشته‌های بسیار دور برمی‌گردد و آثار آن از قبیل شفت‌های قائم استخراجی، سرباره‌های مس‌دار و بقایای بناها و آثار زیستی معدن‌کاران قدیمی در این منطقه قابل مشاهده است (شکل ۳-A و B). در شرایط فعلی، چاه‌ها و دیگر آثار زیر سطحی مسدود شده و

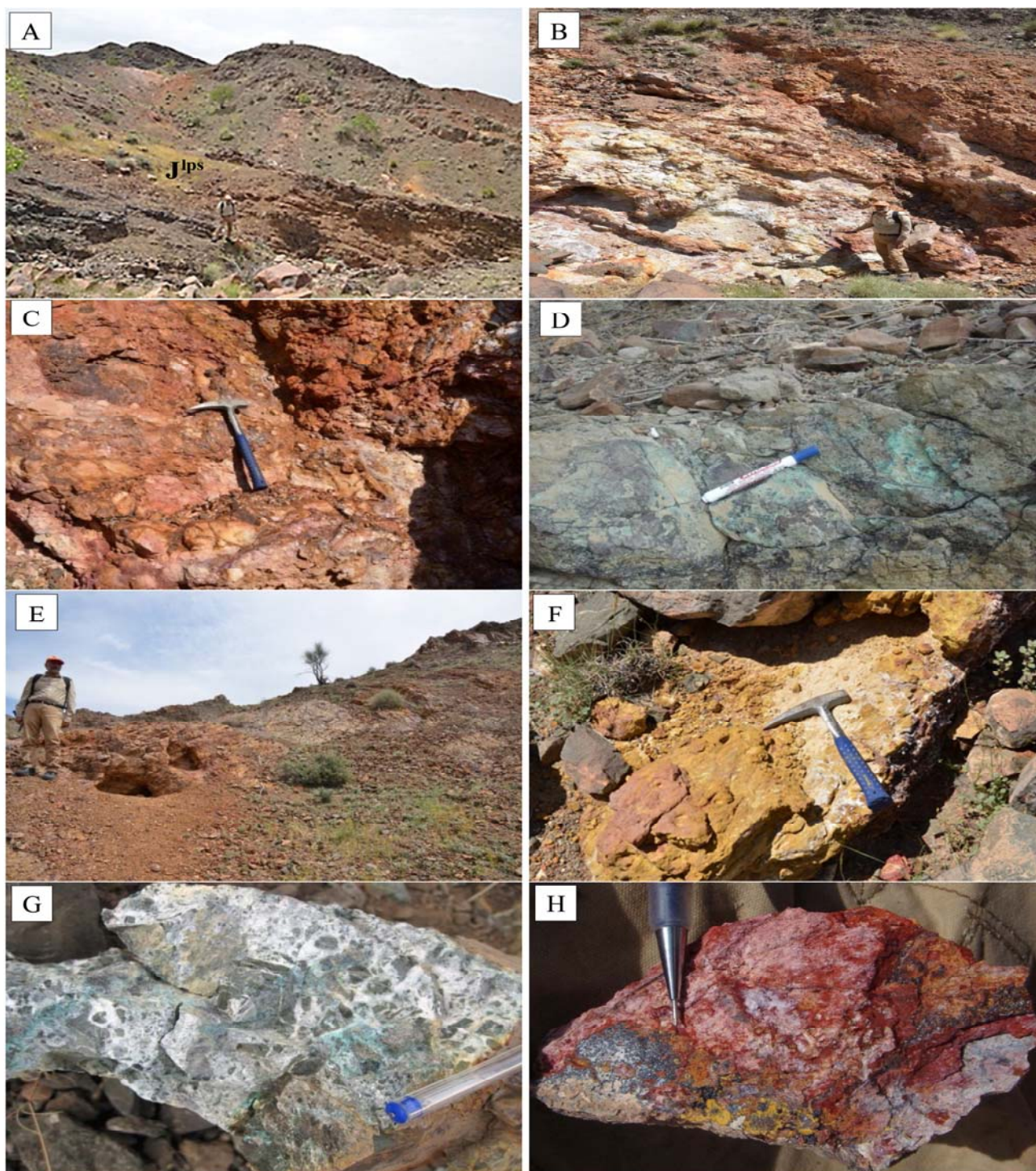
امکان ورود به آنها بدون تجهیزات و ماشین‌آلات مناسب وجود ندارد. با توجه به اینکه حفاری‌های اکتشافی زیرسطحی نیز انجام نشده است، شواهد کانی‌سازی اغلب مرتبط با رخنمون‌های سطحی و یا دپوهای باقی‌مانده از استخراج کانسنگ از چاه‌های قدیمی است.

آثار کانی‌سازی مس به صورت مالاکیت و به شکل آغشتگی‌های سطحی در واحد آتشفشانی-رسوبی (J^{Ips}) قابل مشاهده است (شکل ۳-E, D, F و G). همچنین در نمونه‌های باقی‌مانده در محل‌های قدیمی دپوی ماده معدنی و یا سرباره‌ها، آثار کانی‌سازی مشخص است. کانی‌سازی آهن اغلب به صورت هماتیت و گوتیت مشاهده می‌شود (شکل ۳-C و H). سنگ میزبان ماده معدنی اغلب از گلسنگ‌های آرژیلیتی، سیلتی تا ماسه‌ای دانه‌ریز با میان‌لایه‌های نازک توفی و گدازه‌های با ترکیب بازالتی تشکیل شده است (J^{Ips}). مجموع ضخامت ظاهری رسوبات پلاژیک (واحد J^{Ips}) بیش از ۶۰ متر است. افق کانه‌دار در این واحد بیش از یک کیلومتر در راستای شمال غرب-جنوب شرق رخنمون یافته و شیب لایه‌ها ۲۵ تا ۳۰ درجه به سمت جنوب غرب است.

در طول این افق، آثار متعددی از رخدادهای کانی‌زایی مشاهده می‌شود. این افق به صورت صفحه‌ای با لایه‌های بسیار نازک منظم، همساز و هم‌روند با لایه‌های سنگ دربرگیرنده همانند کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد قابل ردیابی است (شکل ۳-A). با توجه به سن واحد رسوبی-آتشفشانی (ژوراسیک میانی تا کرتاسه آغازی) و رخداد کانی‌سازی که به صورت چینه‌کران همراه با رخساره‌های رسوبی-آتشفشانی دیده می‌شود، کانی‌سازی فلزی می‌تواند در همین محدوده زمانی اتفاق افتاده باشد. افق کانه‌دار در سطح دچار هوازدگی شده؛ به نحوی که در اثر اکسیدشدن، کانه‌های اولیه سولفیدی به اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن و سایر کانی‌ها تجزیه شده و باعث تشکیل زون گوسان شده و رنگ قرمز تیره‌ای برای افق کانه‌دار ایجاد کرده است (شکل ۳-C, E و F).

1. X-Ray Diffraction

2. Scanning Electron Microscopy (SEM)



شکل ۳. کانی‌سازی در منطقه قلعه ریگی، A و B: افق چینه کران سنگ میزبان کانی‌سازی (J^{lps})، دید به سمت جنوب، C: زون اکسیدان غنی از گوتیت دارای ساخت برشی همراه با کانی‌های گروه زاروسیت، D: آثار کانی‌سازی مس به صورت ملاکیت، E: حفاری قدیمی در افق کانی‌زایی، دید به سمت غرب، F: رخنمون زون گوسان، G: برش سیلیسی آغشته به ملاکیت و H: هماتیت (قرمز) و گوتیت (قهوه‌ای)

Fig. 3. Mineralization in the Ghaleh Rigi area, A and B: Stratified ore horizon (J^{lps}), view to south, C: Geothite rich oxidation zone with breccia texture and jarosite group, D: copper mineralization as a malachite, E: Old drilling on ore horizons, view to west, F: Outcrops of gossan, G: Silicified breccia with malachite cover, and H: Hematite (red) and goethite (brown)

بحث و بررسی**بافت و کانی‌شناسی**

گوسان‌ها بر روی افق‌های کانه‌دار، به صورت چینه‌کران و صفحه‌ای شکل قرار داشته و ژئومتری آنها تابعی از شکل استقرار زون سولفیدی اولیه است. ساخت غالب در گوسان‌های محدوده مورد بررسی به صورت نازک‌لایه و منظم است. بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، طی فرایند اکسایش، بیشتر بافت‌های اولیه از بین رفته است. در بررسی‌های میکروسکوپی، بافت‌های توده‌ای، نواری و لامینه‌ای، گل‌کلمی، پراکنده، رگه-رگچه، برشی، پرکننده فضای خالی، جانشینی مشاهده شد (شکل ۴-A تا H). تبدیل پیریت به هیدروکسیدهای آهن با کاهش حجم همراه بوده است (شکل ۴-F). بافت‌های گل‌کلمی و نواری نیز که معرف محیط‌های سطحی و اکسایشی است در بررسی‌های میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل ۴-B و D).

فراوانی هماتیت در اغلب زون‌ها از سایر کانی‌ها بیشتر بوده و سیمای قرمز رنگی به این بخش داده است؛ ولی گاه تناوب تکراری از کانی‌های هماتیت و ژاروسیت با رنگ‌های متفاوت نیز قابل مشاهده است (شکل‌های ۴ و ۵). به طور کلی هیدروکسیدهای آهن در گوسان‌های محدوده مورد بررسی در سه گروه قرار می‌گیرند.

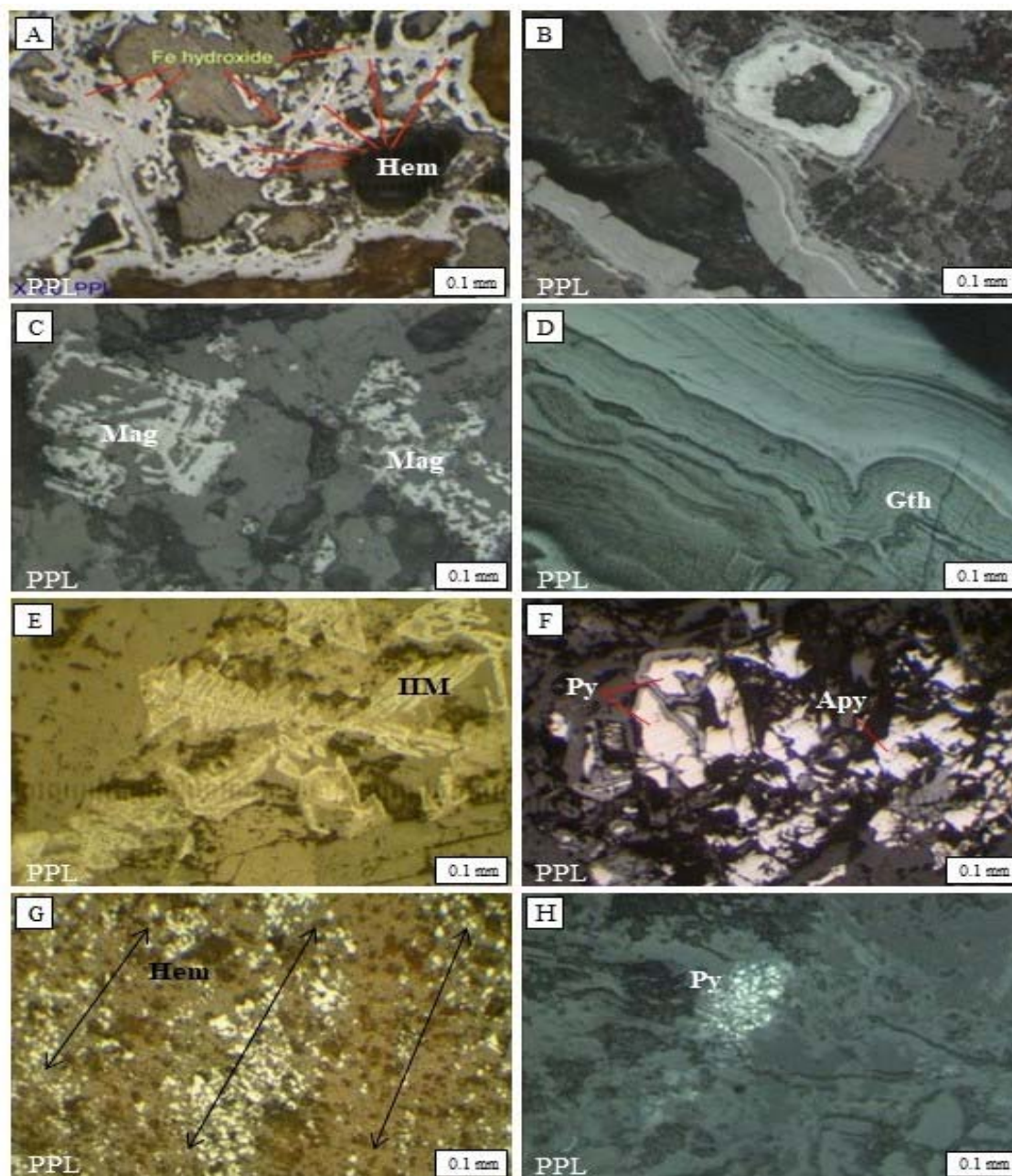
گروه اول هیدروکسیدهای آهن، جانشین کانی‌های پراکنده خودشکل در متن سنگ شده است. در بیشتر مواقع کانی‌های اولیه از بین رفته و هیچ اثری از آنها دیده نمی‌شود؛ ولی با توجه به شکل‌های آنها که به صورت مربع و لوزی به نظر می‌رسد، کانی اولیه پیریت و یا گاهی مگنتیت بوده است (شکل ۴-C و H). پیریت‌های اولیه بعد از مراحل اکسایش گاه توسط کانی‌های باطله مانند کلسیت و دولومیت پر شده و فقط حاشیه‌ای از هیدروکسیدهای آهن از آنها باقی مانده‌اند. حجم این گروه از هیدروکسیدهای آهن در بخش‌های مختلف گوسان‌ها متفاوت است. فراوانی آنها از ۱۰ درصد تا ۸۰ درصد تغییر می‌کند. پراکندگی کانی‌های اولیه سولفوری خودشکل در

سنگ یکسان نیست و این کانی‌ها در برخی نقاط فشرده‌تر بوده و باعث تشکیل بافت‌های موزاییکی شده‌اند. در مواردی نیز کانی‌های اولیه خودشکل هوازده به صورت لایه‌های مویی و زنجیروار به دنبال هم بوده و تشکیل رگچه‌ها با روند خاص و همساز با شکل سنگ دربرگیرنده را داده‌اند (شکل ۴-G).

گروه دوم از اکسید و هیدروکسیدهای آهن در درز و شکاف‌های بعد از تشکیل سنگ اولیه قرار داشته که به نظر می‌رسد، سیالات گرمایی به صورت پرکننده رگه-رگچه در فضاهای خالی وارد شده و سپس اکسید شده‌اند (شکل ۴). حجم این دسته از اکسید و هیدروکسیدهای آهن کمتر از ۱۰ درصد است. در این گروه انواع بافت‌های نواری و گل‌کلمی مشاهده می‌شود (شکل ۴-D). بیشترین مقدار این گروه از هیدروکسیدهای آهن در زون‌هایی که دارای ساختار برشی بوده، مشاهده می‌شود.

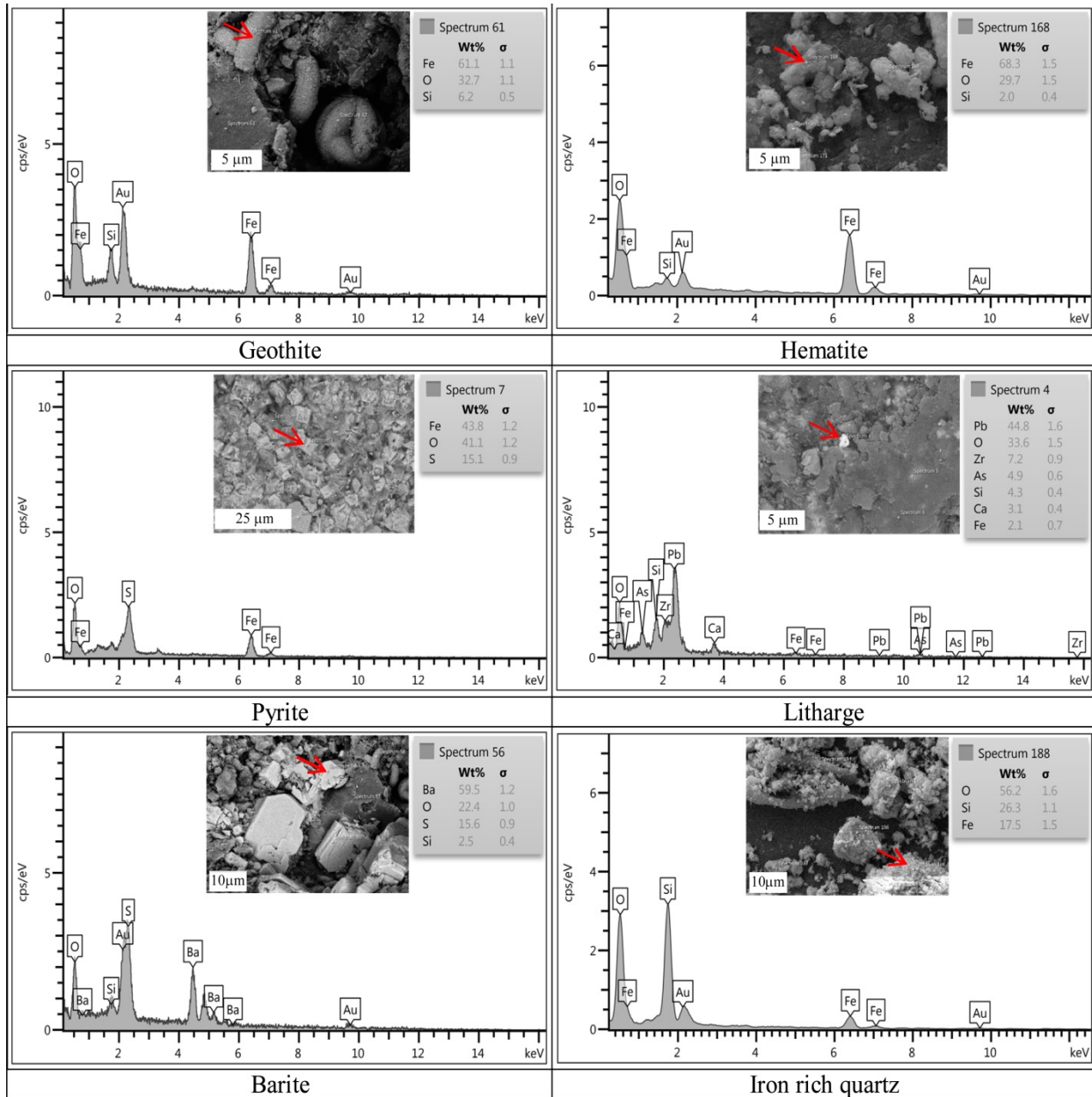
گروه سوم، شامل ذرات بسیار ریز (میکروسکوپی) بوده که باعث آغشتگی کانی‌های باطله در سنگ شده است.

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، پراش پرتو ایکس و بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی، در گوسان‌های این ناحیه کانی‌های هماتیت، گوتیت، کوارتز و گروه ژاروسیت (ناتروژاروسیت، ژاروسیت و نظایر آن) فراوان هستند. ژاروسیت و ناتروژاروسیت کانی‌هایی هستند که در شرایط اکسیدان و pH کمتر از ۳ تشکیل می‌شوند (Boyle, 2003). فقدان ظاهری آلونیت دلالت بر نسبت مولی $Fe/Al > 1$ دارد و حضور ژاروسیت و ناتروژاروسیت نشان می‌دهد که در هنگام شکل‌گیری گوسان، نسبت سهم پتاسیم و سدیم متغیر بوده است. در این بررسی‌ها کانی‌های باریت، کلسیت، دولومیت و کانی‌های رسی (ایلمنیت، کلریت، مونت‌موریلونیت و کائولینیت) نیز شناسایی شدند. در مواردی اکسید تیتانیوم با فراوانی کمتر یک درصد در سطح نمونه به صورت دانه‌های نیمه‌شکل‌دار با ابعاد ۵۰ میکرون پراکنده است (شکل ۴-E). برخی از تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از شواهد کانی سازی در منطقه قلعه ریگی، A: بافت پرکننده فضای خالی و تبدیل سولفید اولیه به هماتیت و هیدروکسیدهای آهن، B: بافت جانشینی و نواری در هیدروکسیدهای آهن، C: مگنتیت در حال تبدیل به هیدروکسید آهن، D: گوتیت با بافت کلو فرم، E: بلورهای اسکلتی ایلمنیت به عنوان کانی بازماندی، F: تبدیل آرسنوپیریت و پیریت به هیدروکسید آهن، G: بافت زنجیروار کانی های هماتیت و H: کانی پیریت. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Gth: گوتیت، ILM: ایلمنیت، Apy: آرسنوپیریت، Py: پیریت).

Fig. 4. Microscopic photos from mineralization evidences in the Ghaleh Rigi area, A: The filling space texture, the primary sulfide altered to hematite and iron hydroxides, B: Replacement and ribbon texture in iron hydroxide, C: Magnetite changes to hydroxide, D: Geothite with colloform texture, E: Skeletal texture in ilmenite as a residue mineral, F: Alteration of arsenopyrite and pyrite into iron hydroxide, G: Chain texture of hematite minerals, and H: Pyrite mineral. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Hem: Hematite, Mag: Magnetite, Gth: Geothite, ILM: Ilmenite, Apy: Arsenopyrite, Py: pyrite).



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیف آنالیز از نمونه‌های گوسان منطقه قلعه ریگی. محور افقی انرژی (keV) است. فلش قرمز رنگ نقطه محل آنالیز را نشان می‌دهد.

Fig. 5. Back scattered electron images and analysis spectra of gossan samples from the Ghaleh Rigi area. The x-axis is Energy (keV). The red arrow indicates the point of analysis.

این عناصر از بالا به پایین بیانگر نظم خاص و تغییرات منظمی است که می‌تواند در راستای اکتشاف ذخیره سولفید توده‌ای مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس نتایج تجزیه‌های شیمیایی، در افق بالایی گوسان که حدود ۱۳ متر ضخامت دارد و با حجم

زمین‌شیمی

نتایج تجزیه شیمیایی بخش‌های مختلف گوسان برای عناصر طلا، نقره، آرسنیک، آنتیموان، باریوم، بیسموت، مس، سرب، روی و کبالت در جدول ۱ ارائه شده است. بررسی روند تغییرات

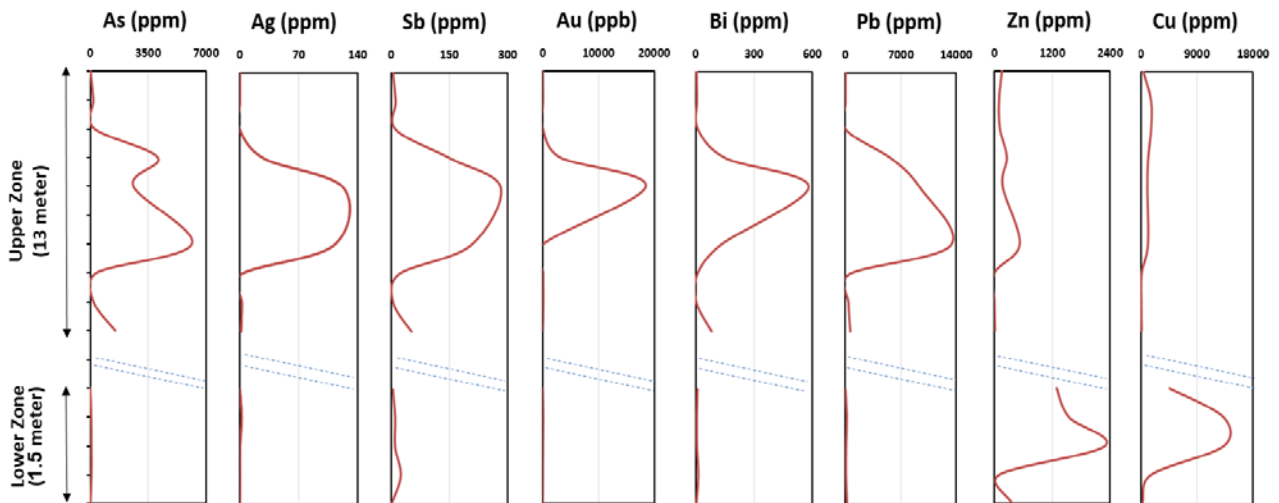
ردیاب طلا است، بالاتر از ناهنجاری عنصر طلا آشکار شده است (شکل ۶). بالاترین مقدار طلا در بخش گوسان ۱۸/۵ گرم در تن و نقره ۱۲۳ گرم در تن اندازه‌گیری شده که بسیار قابل توجه است (جدول ۱). با توجه به این عیار، گوسان‌های مورد بررسی در این محدوده در دسته گوسان‌های غنی از طلا قرار می‌گیرند.

زیادی از کانی‌های هماتیت و گوتیت همراه است، ناهنجاری عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان، نقره، سرب و بیسموت به خوبی مشاهده می‌شود. در مقابل، در افق پایین با ضخامت حدود ۱/۵ متر، ناهنجاری عناصر مس و روی دیده می‌شود؛ در حالی که غنی‌شدگی دیگر عناصر اندازه‌گیری شده مشاهده نمی‌شود (شکل ۶). در افق بالا، ناهنجاری آرسنیک که خود یک عنصر

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر به روش ICP-AES در گوسان‌های منطقه قلعه ریگی

Table 1. Results of chemical analysis of elements by ICP-AES method in gossans from the Ghaleh Rigi area

Horizon	Sample no.	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Ba (ppm)	Bi (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)
	gr-95-301	20	0.4	20	167	5	401	30	5	159	40
	gr-95-302	84	0.4	194	528	7	1646	35	12	99	37
	gr-95-303	55	0.7	247	1032	12	1664	128	14	115	33
	gr-95-304	3127	30	4094	1208	154	1189	5862	154	260	57
Upper zone	gr-95-305	18513	123	2615	351	580	1058	9439	281	172	25
	gr-95-310	174	112	6157	1213	130	1144	13333	205	528	35
	gr-95-311	101	3	393	1039	10	147	519	21	5	4
	gr-95-312	130	3	198	1305	4	89	394	6	2	6
	gr-95-313	32.0	2	1524	244	83	135	620	53	14	3
	gr-95-347	18	0.5	4	371	9	4621	15	5	1293	23
	gr-95-342	112	3	66	243	6	13333	178	11	1546	63
Lower zone	gr-95-343	55	0.6	80	46	7	13333	99	11	2293	70
	gr-95-344	40	0.6	84	56	14	1621	85	26	98	43
	gr-95-345	10	0.4	14	899	4	246	215	2	377	7



شکل ۶. مقایسه تغییرات ناهنجاری عناصر انتخابی نسبت به عمق در گوسان‌های در منطقه قلعه ریگی

Fig. 6. Comparison of anomalies of selected elements with respect to depth in the gossans from Ghaleh Rigi area

مقادیر سایر عناصر در این افق کاهش یافته؛ به طوری که بالاترین میزان طلا حدود ۱۱۲ میلی‌گرم در تن، سرب ۲۱۵ گرم در تن و آرسنیک ۸۴ گرم در تن و نقره ۰/۶ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (جدول ۱ و شکل ۶).

نتایج تجزیه نمونه‌های سطحی برداشت‌شده از محل سربراه‌ها و محل‌های معدن‌کاری قدیمی و واریزه‌های دپوی باطله ماده معدنی در جدول ۲ ارائه شده است.

بالاترین مقدار عنصر سرب میزان ۱/۳ درصد است که با تغییرات نقره نیز همبستگی مثبت نشان می‌دهد. در این افق بیشترین مقدار عنصر مس ۰/۱۶ درصد، آرسنیک ۰/۶۱ درصد، باریم ۰/۱۳ درصد، بیسموت ۵۸۰ گرم در تن و آنتیموان ۲۸۰ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (جدول ۱ و شکل ۶). در افق پایین، ناهنجاری عناصر مس و روی به شدت افزایش یافته است. در این بخش بیشینه عنصر مس ۱/۳۳ درصد و روی ۰/۲۳ درصد است.

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر به روش ICP-AES در سربراه‌های در منطقه قلعه ریگی

Table 2. Results of chemical analysis of elements by ICP-AES method in slags from Ghaleh Rigi area

Sample no.	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Bi (ppm)	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Mn (ppm)	Cd (ppm)
89-Q6m	97	0.5	23	3	0.5	61	144	75	19	560	0.1
89-Q17m	85	3	59	91	15	634	6004	16495	412	601	3
89-Q5m	7509	102	1822	84	9	12634	616	238	59	23	18
89-Q18m	558	3	486	41	19	254	1378	329	165	21	7
89-Q13m	232	1	68	8	19	135	283	155	49	89	2
89-Q14m	952	4	397	26	29	652	1025	671	143	28	6

کانی سازی غنی سولفیدی در اعماق معین در زیر گوسان‌های این منطقه بسیار محتمل و قابل انتظار است. برای درک بهتر ارتباط و همبستگی میان عناصر در گوسان‌های مورد بررسی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده بین عناصر طلا، بیسموت، نقره و آنتیموان در حد ۰/۹۷ تا ۰/۷۸ و عناصر مس و روی و منگنز در حد ۰/۹۳ تا ۰/۸۷ و همچنین عناصر سرب، نقره، مولیبدن، آنتیموان و آرسنیک در حد ۰/۹۳ تا ۰/۷۹ همبستگی مثبت مشاهده می‌شود؛ در حالی که طلا با مس و روی ارتباط منفی نشان می‌دهد (جدول ۳).

در محل نمونه برداری، آثار کانی سازی به صورت اکسیدهای آهن باقی مانده از کانی های سولفیدی به همراه آغشتگی های اندک مالاکیت مشاهده می شود. مقادیر بیشینه طلا تا ۷/۵ گرم در تن و روی تا ۱/۶ درصد در نمونه های سربراره و باطله باقی مانده در سطح، عیار بالایی را برای این عناصر نشان می دهد. نمونه ای که از بخش های کمتر اکسید شده، برداشت شده نیز حاوی ۰/۶ درصد مس بوده که به عنوان شاهد کانی سازی مس مدنظر است. با توجه به اینکه این نمونه ها از سربراره و یا باقی مانده دپوی باطله ماده معدنی که حاصل فعالیت های معدن کاری قدیمی در این منطقه است، برداشت شده، وجود

جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون عناصر مورد بررسی در منطقه قلعه ریگی

Table 3. Pearson's correlation matrix for studied elements in the Ghaleh Rigi

	Au	Ag	As	Ba	Bi	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
Au	1											
Ag	0.727	1										
As	0.317	0.799	1									
Ba	-0.132	0.156	0.398	1								
Bi	*0.971	*0.836	0.516	-0.058	1							
Co	-0.003	0.046	0.115	-0.385	-0.016	1						
Cu	-0.155	-0.206	-0.259	-0.42	-0.207	0.649	1					
Mn	-0.198	-0.259	-0.302	-0.522	-0.26	0.628	*0.873	1				
Mo	0.456	*0.824	0.796	0.134	0.603	0.063	-0.273	-0.36	1			
Pb	0.552	*0.950	*0.921	0.262	0.698	0.126	-0.245	-0.28	*0.833	1		
Sb	0.774	*0.936	*0.814	0.1	*0.879	0.12	-0.268	-0.311	0.779	*0.934	1	
Zn	-0.168	-0.134	-0.166	-0.371	-0.197	0.567	*0.929	*0.892	-0.224	-0.152	-0.219	1

* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

سروزیت و آنگلزیت حفاظت می‌شود (Sangameshwar and Banes, 1983; Esmaeili Sovieri et al., 2020).

توزیع عناصر خاکی کمیاب (جدول ۴) در افق‌های بالا و پایین گوسان‌های منطقه مورد مطالعه و مقایسه مقادیر بهنجار شده آن با میانگین عناصر خاکی کمیاب در تعدادی از گوسان‌های مرتبط با ذخایر شناخته شده سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در سطح جهان در شکل ۷ ارائه شده است. چنان‌که در شکل دیده می‌شود، الگوی پراکنده‌گی این عناصر، در محدوده گوسان‌های بارور ذخایر سولفید توده‌ای قرار دارد (شکل ۷).

گی‌ری (Gieré, 1993) و پیتر و همکاران (Peter et al., 2003) اعتقاد دارند کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد قدیمی و مدرن (در حال تشکیل در زمان حاضر)، هر دو دارای محتوای REE بسیار متغیر هستند؛ اما به‌طور کلی کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد قدیمی نسبت به سیالات رگه‌ای مدرن از REE بسیار غنی‌تر هستند و این نشان می‌دهد که عناصر کمیاب خاکی بیشتر در طول تشکیل سولفیدهای فلزی پایه به دام افتاده‌اند. در گوسان‌های بررسی شده، غنی‌شدگی مثبت؛ ولی بسیار اندک Eu مشاهده می‌شود (شکل ۷). بر اساس گراف (Graf, 1977) در حالت کلی، الگوی عناصر نادر خاکی در یک سنگ اسیدی به دلیل همراه بودن Eu با فلدسپات‌های سدیم و پتاسیم‌دار دارای آنومالی Eu مثبت است. بنابراین سیالی که با یک سنگ اسیدی واکنش می‌دهد، می‌تواند به آنومالی مثبت Eu در سولفید توده‌ای منجر شود.

در حالی که آنومالی Eu در سیالی که با سنگ‌های مافیکی واکنش می‌دهد، ممکن است کمتر از سنگ‌های اسیدی باشد؛ الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب در قسمت‌های پایین زون گوسان، نوسان کمتری دارد و به حالت مسطح نزدیک می‌شود (شکل ۷). بررسی‌هایی که روی ماگماتیسیم مافیکی هم‌زمان با رسوب‌گذاری در منطقه انجام شده نیز الگوی توزیع نسبتاً مسطح عناصر خاکی کمیاب را نشان می‌دهند (Jahangiri et al., 2020).

سرب به‌طور معمول تحرک کمی دارد و در pH پایین در ترکیب گروه ژاروسیت و در pH بالاتر در کانی‌های آنگلزیت و سروزیت جایگزین می‌شود (Boyle, 2003; Leybourne et al., 2006). همبستگی مثبت بین عناصر نقره و سرب می‌تواند ناشی از حضور نقره در ترکیب سولفیدهای سرب اولیه (احتمالاً گالن) باشد که پس از اکسیدشدن و تشکیل لیتارژ عنصر نقره از ساختمان آن آزاد شده است (Scott et al., 2001). همچنین در کانی‌های سولفیدی، بیسموت می‌تواند در پیریت، گالن و بیسموتیت حضور داشته باشد (Scott et al., 2001).

همبستگی میان بیسموت با عناصر یادشده نیز احتمالاً ناشی از جانشینی آن در کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت است و در برخی از گوسان‌ها می‌تواند شاخصی مناسب برای اکتشاف موردنظر باشد (Atapour and Aftabi, 2007; Yousefi et al., 2015). طلا می‌تواند توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن نظیر گوتیت و هماتیت میزبانی شود و یا همراه و داخل کوارتز و دیگر فازهای غنی از سیلیس محصور شود و در این افق‌ها تمرکز یابد (Hunt, 1977; Salama et al., 2019). آنتیموان و آرسنیک نیز در شرایط اسیدی جذب گوتیت می‌شوند و در فرایند شست‌وشو از محیط خارج نمی‌شوند. فرایند جدایش این عناصر می‌تواند در pH قلیایی رخ دهد (Ritchie et al., 2013; Parbhakar-Fox et al., 2017; Salama et al., 2019). گوتیت همچنین می‌تواند میزبان کبالت باشد (Salama et al., 2019) و مقدار کبالت در فازهای مختلف اکسید آهن به وسیله pH و درجه حرارت کنترل می‌شود (Beukes et al. 2000; Pivovarov 2001). در برخی گوسان‌های تشکیل شده بر روی ذخایر سولفید توده‌ای، حضور عنصر کبالت از شاخص‌های مهم است (Ozdemir and Sahinoglu, 2018).

در گوسان‌های مورد بررسی میزان عنصر کبالت پایین بوده؛ این حال همبستگی مثبت بین کبالت با عناصر مس و روی قابل مشاهده است. با توجه به شرایط اکسایش و محیط اسیدی، روی و مس تمایل دارند که به بخش‌های پایینی مهاجرت کنند. در چنین شرایطی سرب به نسبت تحرک کمتری دارد و با غشای

جدول ۴. نتایج تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS عناصر خاکی کمیاب (بر حسب گرم در تن) در گوسان‌های منطقه قلعه ریگی

Table 4. Results of chemical analysis of rare earth elements (ppm) by ICP-MS method in gossans from the Ghaleh Rigi

Sample no.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
gr-95-301	3.3	7.9	7.9	14.5	2.5	1.3	6.0	0.8	4.2	0.3	3.8	0.6	4	0.5
gr-95-302	10.7	18.8	15.0	18.7	1.9	0.9	3.7	1.4	1.0	0.5	2.3	1.0	3	0.9
gr-95-303	13.6	22.2	16.2	18.4	2.0	0.9	3.7	1.4	1.0	0.5	2.2	1.0	3	1.0
gr-95-304	1.4	2.8	32.8	21.8	1.9	0.5	0.6	3.1	0.7	1.0	4.7	2.4	3	2.2
gr-95-305	8.0	14.3	12.2	18.3	1.2	0.5	1.6	1.0	0.7	0.3	2.0	0.8	1	0.7
gr-95-310	2.1	0.7	21.8	15.1	0.9	0.3	0.9	2.0	0.7	0.6	3.6	1.6	3	1.6
gr-95-311	3.5	5.9	5.9	5.7	0.7	0.3	4.3	0.6	1.3	0.3	2.4	0.3	3	0.4
gr-95-312	3.7	8.6	2.9	4.1	0.5	0.3	5.1	0.3	2.2	0.3	3.3	0.2	4	0.2
gr-95-313	11.5	19.8	4.3	8.5	1.4	0.3	5.2	0.1	1.4	0.3	1.5	0.1	2	0.1
gr-95-347	17.0	29.5	10.8	21.0	2.9	1.1	4.8	1.0	7.0	0.7	5.5	0.6	5	0.6
gr-95-342	19.1	45.1	12.1	39.7	9.0	3.4	8.7	1.7	15.4	1.2	9.5	0.6	9	0.5
gr-95-343	15.0	35.9	11.3	28.1	5.3	2.5	6.8	1.4	13.1	0.9	9.4	0.6	8	0.5
gr-95-344	11.4	16.9	25.0	21.9	2.0	0.6	3.0	2.3	0.7	0.8	4.4	1.8	4	1.6
gr-95-345	1.5	1.9	3.0	3.7	0.5	0.1	3.2	0.2	1.0	0.3	0.8	0.2	2	0.2

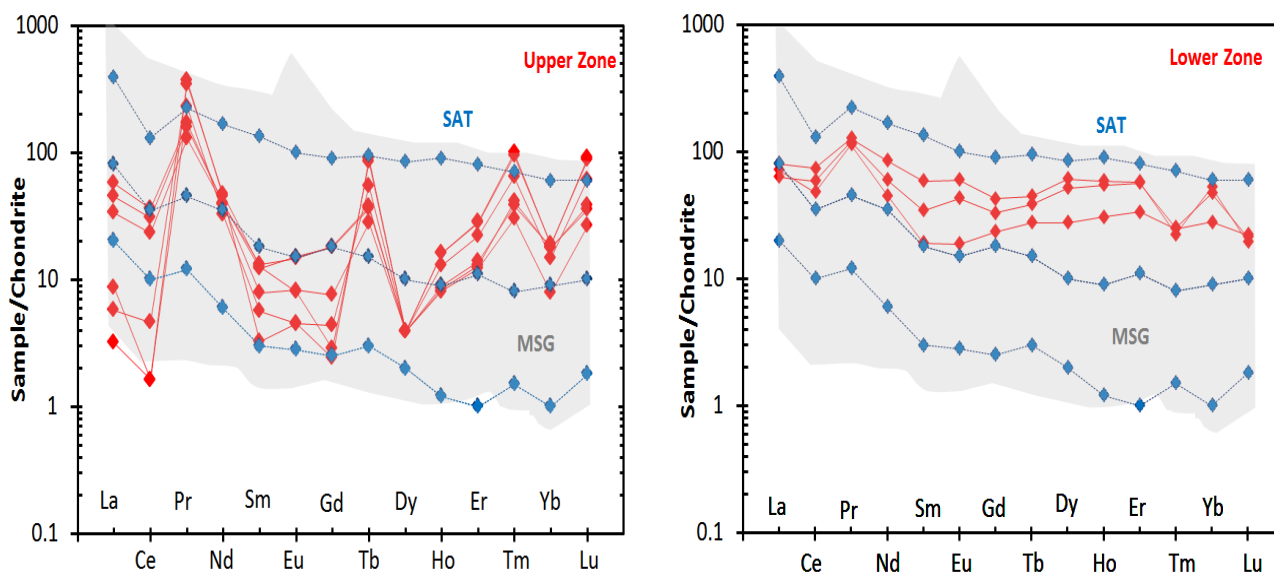
برونزاد در زیر گوسان غنی می‌کنند؛ تا حدی که حتی کانی‌سازی‌های سولفیدی اولیه عیار پایین نیز می‌توانند ذخایر اقتصادی تشکیل دهند (Boyle, 1996; Volesky et al.,)

فرایندهای هوازدگی که بر روی سولفیدهای توده‌ای عمل می‌کنند (به عنوان مثال هوازدگی برونزاد یا تشکیل گوسان) از این نظر نیز مهم هستند که فلزات گران‌بها و پایه را در زون

(2017).

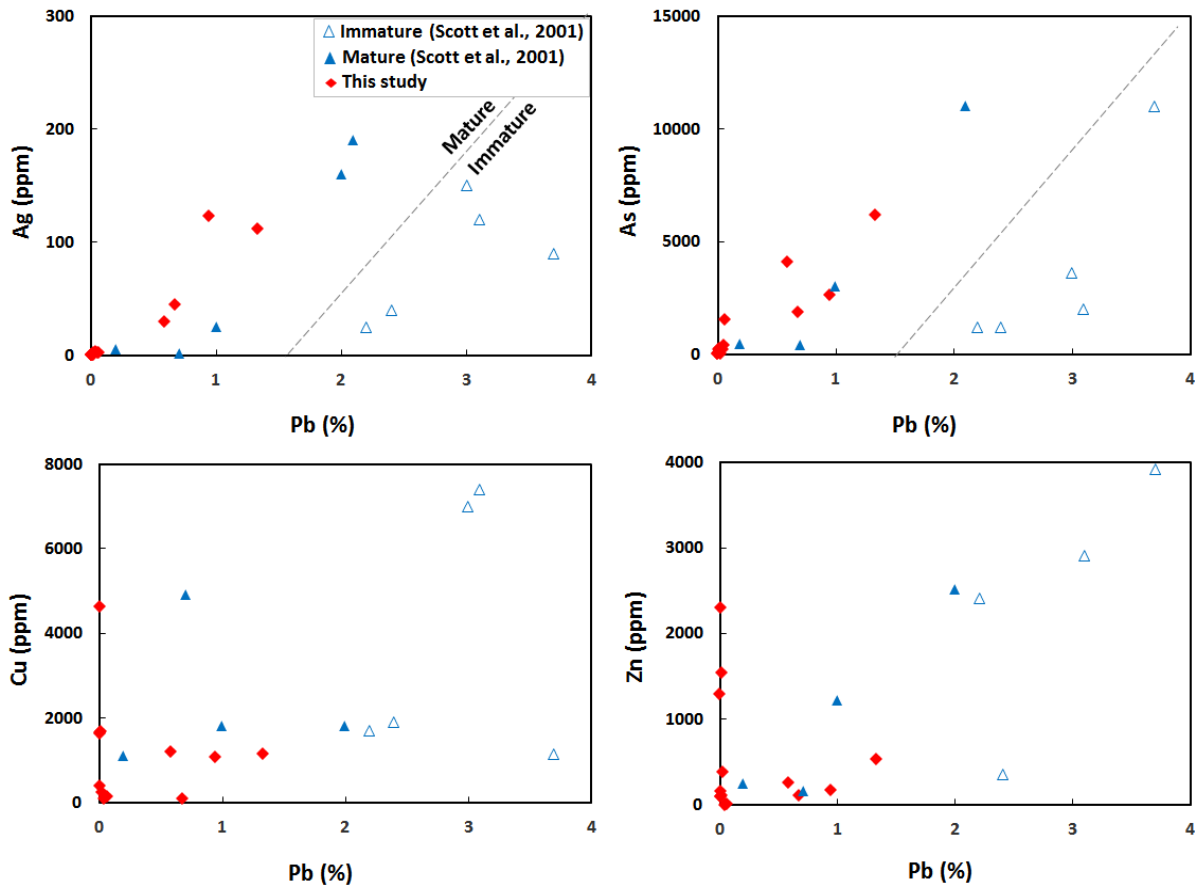
بررسی‌های ژئوشیمیایی همچنین برای شناخت گوسان بالغ از نابالغ استفاده می‌شود. گرچه ترکیب گوسان تحت‌تأثیر کانه اولیه است؛ معمولاً گوسان‌های با محتوای سرب زیاد (بیشتر از ۴ درصد) در رده گوسان‌های نابالغ قرار دارند و محتوای آرسنیک پایین نیز دارند. میانگین سرب اندازه‌گیری‌شده در گوسان‌های منطقه حدود ۲۵۰۰ گرم در تن است. در گوسان‌های مورد بررسی، محتوای نقره نیز بالا نیست (کمتر از ۱۵۰ گرم در تن) و یک رابطه نسبتاً خطی در افزایش محتوای نقره همراه با سرب مشاهده می‌شود. بر اساس محتوای نقره و آرسنیک در برابر سرب و مقایسه آن با گوسان‌های بالغ و نابالغ مشخص می‌شود که این گوسان‌ها در رده بالغ قرار می‌گیرند (شکل ۸). روند

تغییرات عناصر مس، روی و سرب نیز نزدیکی بیشتری با گوسان‌های بالغ دارد (شکل‌های ۸ و ۹). میزان بالاتر عنصر مس به درجه بلوغ کمتر گوسان دلالت دارد. در گوسان‌های مورد بررسی، میانگین مس حدود ۲۷۰ گرم در تن است که در مقایسه با گوسان‌های نابالغ (میانگین ۱۶۰۰۰ گرم در تن) بسیار کمتر است. لذا نتایج تجزیه شیمیایی گوسان‌های بررسی شده و حضور مقادیر قابل توجه طلا و مس در افق‌های مختلف بیانگر آن است که این گوسان‌ها در رده گوسان‌های بالغ و بارور قرار می‌گیرند. منطقه‌بندی مشاهده شده بیانگر حفظ کانسار سولفید توده‌ای در عمق است و به عنوان کلیدی اکتشافی در پی‌جویی ذخایر سولفید توده‌ای این ناحیه بسیار با اهمیت است.



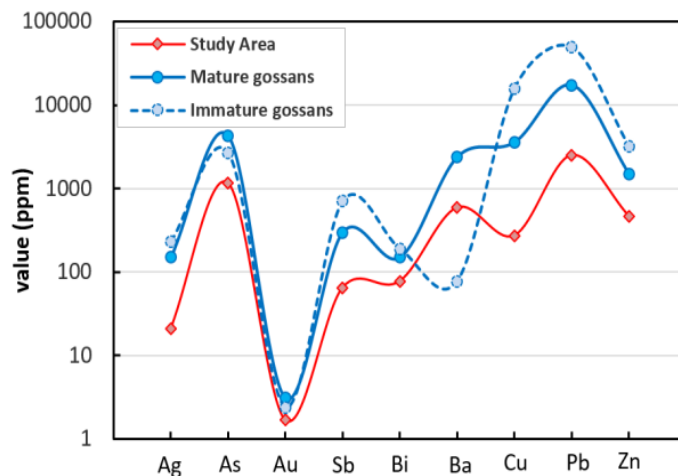
شکل ۷. مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های گوسان منطقه قلعه ریگی (نقاط قرمز)، بهنجار شده به کندریت با نمونه گوسان‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در مقیاس جهانی. داده‌های MSG (گوسان در Bathurst Mining Camp، کانادا، منطقه خاکستری) از بویل (Boyle, 2003) و لیورن و همکاران (Leybourne et al., 2006) و SAT (گوسان ذخیره Shaib al Tair در عربستان، نقاط آبی) از ولسکی و همکاران (Volesky et al., 2017) و مقادیر بهنجارسازی از بینتون (Boynton, 1984) است.

Fig. 7. Chondrite-normalized REE patterns of gossan samples from the Ghaleh Rigi area (red points), comparing with other VMS gossans in world scale. MSG (gossan from Bathurst Mining Camp, Canada, gray zone) from Boyle (2003) and Leybourne et al. (2006) and SAT (gossan from Shaib al Tair deposit, Saudi Arabia, blue points) from Volesky et al. (2017). Normalizing values are from Boynton (1984).



شکل ۸. مقایسه محتوای نقره، آرسنیک، مس و روی در برابر سرب نمونه‌های گوسان منطقه قلعه ریگی، با تعدادی از گوسان‌های بالغ و نابالغ (Scott et al., 2001)

Fig. 8. Comparison of silver, arsenic, copper and zinc content versus lead in the gossan sample from the Ghaleh Rigi area, with some mature and immature gossans (Scott et al., 2001)



شکل ۹. مقایسه میانگین عناصر در گوسان‌های منطقه قلعه ریگی، با تعدادی از گوسان‌های بالغ و نابالغ ذخایر سولفید توده‌ای (Scott et al., 2001)

Fig. 9. Comparison of the average of elements in the gossan sample from the Ghaleh Rigi area, with the average of a number of mature and immature gossans of the massive sulfide deposits (Scott et al., 2001)

نتیجه‌گیری

در محدوده مورد بررسی، رخنمون‌های متعددی از افق‌های حاصل از هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی، همراه با آثار فعالیت‌های معدن‌کاری و سرباره‌های کوره‌های ذوب قدیمی مورد شناسایی قرار گرفت. این رخنمون‌ها که از آنها به عنوان گوسان یاد می‌شود، از نظر زمین‌شناسی با سنگ‌های رسوبی نظیر گل‌سنگ، شیل، لایه‌های ظریف و منظم چرت‌های رادیولاریتی همراه با لایه‌های منفصل، پراکنده و عدسی‌شکل گدازه‌های بالشی (ژوراسیک) دیده می‌شوند که توسط دایک‌های دیوریتی - گابرویی قطع شده‌اند. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، پراش پرتو ایکس و بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی، در گوسان‌های این ناحیه کانی‌های هماتیت، گوتیت، کوارتز و گروه ژاروسیت (ناتروژاروسیت، ژاروسیت و نظایر آن) شناسایی شدند.

نتایج تجزیه شیمیایی بخش‌های مختلف گوسان برای عناصر طلا، نقره، آرسنیک، آنتیموان، باریم، بیسموت، مس، سرب، روی و کبالت بیانگر مقادیر بالای فلزات با ارزش در افق‌های مختلف است. با توجه به پژوهش‌هایی که توسط موسیوند و دولتخواه (Mousivand and Dowlatkah, 2006) و موسیوند و همکاران (Mousivand et al., 2018) در رابطه با رخداد انواع گوناگون کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در مقیاس ناحیه‌ای انجام شده است و همچنین نحوه توزیع عناصر کمیاب خاکی در این گوسان‌ها که قابل مقایسه با میانگین

عناصر خاکی کمیاب گوسان‌های مرتبط با ذخایر شناخته‌شده سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در سطح جهان است، می‌توان آنها را در محدوده گوسان‌های بالغ و بارور مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای قرار داد. ویژگی‌های ژئوشیمیایی سیالات تشکیل‌دهنده گوسان‌های مورد بررسی نیز شباهت‌هایی با الگوهای معرفی شده در ذخایر سولفید توده‌ای نشان می‌دهد و با سیالات گرمابی حرارت پایین (کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) که اغلب ناهنجاری‌های Eu مثبت ندارند (Michard, 1989)، متفاوت است.

نتایج ارائه‌شده در این پژوهش در رابطه با جایگاه زمین‌شناسی، نوع سنگ میزبان، ساختار، ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی و میزان بالای عناصر فلزی نظیر طلا، نقره، مس، سرب در گوسان‌های منطقه، ضمن آشکار کردن ارزش اقتصادی این گوسان‌ها، احتمال وجود ذخایر ارزشمند سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد را بسیار قوت بخشیده است و انجام بررسی‌های تکمیلی، به‌ویژه اکتشافات زیرسطحی در این منطقه و نواحی مشابه آن پیشنهاد می‌شود.

قدردانی

این پژوهش به عنوان بخشی از طرح پژوهشی رساله دکتری نویسنده اول مقاله، در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. از خانم دکتر ملیحه قورچی و آقای مهندس سروش سعادت به خاطر همکاری‌های علمی و کاربردی صمیمانه سپاسگزاریم.

References

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148(5-6): 692-725.

<https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
Andrew, R.L., 1980. Supergene alteration and gossan textures of base-metal ores in Southern Africa. *Minerals Science and Engineering*, 12(4): 193-215. Retrieved October 10, 2019 from <https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F9>

78-94-011-8056-6_7

Andrew, R.L., 2000. Short Course in Evaluation of Gossans in Mineral Exploration. Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral Brasileiro, Brasília, 57 pp.

Atapour, A. and Aftabi, A., 2007. The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 93(1): 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.07.007>

Badrzadeh, Z., Sabzehei, M., Rastad, E., Emami, M. and Gimeno, D., 2010. Various stages of Sulfide Mineralization in Sargaz Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Northwest Jiroft, Southern Sanandaj-Sirjan. *Journal of Geosciences*, 19(76): 85–94. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2018.55653>

Beukes, J.P., Giesekke, E.W. and Elliot, W., 2000. Nickel retention by goethite and hematite. *Minerals Engineering*, 13(14–15): 1573–1579. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00140-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00140-0)

Blain, C.F. and Andrew, R.L., 1977. Sulphide weathering and themineral evaluation of gossans in mineral exploration. *Minerals Science and Engineering*, 9(3): 119–150. Retrieved October 10, 2019 from https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F0-387-30842-3_44

Blanchard, R., 1968. Interpretation of Leached Outcrops. Nevada Bureau of Mines and Geology, Nevada, 66 pp.

Borna, B. 2008. Copper exploration in Ghaleh Rigi area with a map of scale 1:1000, Kerman province. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 87/023, 62 pp.

Boudeulle, M. and Muller, J.P., 1988. Structural characteristics of hematite and goethite and their relationships with kaolinite in a laterite from Cameroon. A TEM study. *Bulletin de Minéralogie*, 111(2): 149–166. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1988.8080>

Boyle, D.R., 1996. Supergene base metals and precious metals. In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian mineral deposit types*. Geologic Survey of Canada, Ottawa, pp. 92–108. <http://dx.doi.org/10.4095/207946>

Boyle, D.R., 2003. Preglacial weathering of massive sulfide deposits in the Bathurst Mining Camp: Economic geology, geochemistry, and exploration applications. In: W.D. Goodfellow, S.R. McCutcheon and J.M. Peter (Editors), *Massive Sulphide Deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and Northern Maine*. Economic Geology Monograph, Littleton, pp. 689–721. Retrieved October 10, 2019 from <https://www.segweb.org>

Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>

Esmaeili Sovieri, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mahboubi, A., 2020. Knowledge-driven Approach to Exploration of Carbonate Hosted Zinc and Lead Deposits, Case study: North Irankuh district, Isfahan - Iran. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 565-602. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V11I4.79111>

Essalhi, M., Sizaret, S., Barbanson, L., Chen, Y., Lagroix, F., Demory, F., Nieto, J.M., Saez, R. and Capitan, M.A., 2011. A case study of the internal structures of gossans and weathering processes in the Iberian Pyrite Belt using magnetic fabrics and paleomagnetic dating. *Mineralium Deposita*, 46(8): 981–999. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0361-8>

Gahlan, H. and Ghrefat, H., 2018. Detection of Gossan Zones in Arid Regions Using Landsat 8 OLI Data: Implication for Mineral Exploration in the Eastern Arabian Shield, Saudi Arabia. *Natural Resources Research*, 27(1): 109–124. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9341-8>

Gieré, R., 1993. Transport and deposition of REE in H₂S-rich fluids: evidence from accessory mineral assemblages. *Chemical Geology*, 110(1–3): 251–268. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90257-J](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90257-J)

Graf, J.L., 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks. *Economic Geology*, 72(4): 527–548. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.4.527>

- Hannington, M.D., Thompson, G., Rona, P.A. and Scott, S.D., 1988. Gold and native copper in supergene sulphides from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 333: 64–66. <https://doi.org/10.1038/333064a0>
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>
- Jahangiri, H., Saadat, S., Mazaheri, S.A., Heidarian Shahri, M.R., Foudazi, M. and Omrani, J., 2020. The middle Jurassic–Early Cretaceous pillow and massive lava flows associated with pelagic sediments in the Ghaleh-Rigi area, southern east of Iran: age and geochemistry. *Geopersia*, 1.0(2): 245–261. <https://doi.org/10.22059/geope.2019.278194.648471>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esfandiarpour, A. and Mohammadnezhad, H., 2012. Neyshabour turquoise mine: the first Iron Oxide Cu-Au-U-LREE (IOCG) mineralized system in Iran. *Journal of Economic Geology*, 3(2): 193–216. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V3I2.11420>
- Leybourne, M.I., Peter, J.M., Layton-Matthews, D., Volesky, J. and Boyle, D.R., 2006. Mobility and fractionation of rare earth elements during supergene weathering and gossan formation and chemical modification of massive sulfide gossan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1097–1112. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.11.003>
- Michard, A., 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(3): 745–750. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90017-3)
- Mousivand, F. and Dolatkah, R., 2006. Copper mineralization in the Mata area, southwest of Jiroft. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 85/016, 75 pp.
- Mousivand, F., Rastad, E., Peter, J.M. and Maghfouri, S., 2018. Metallogeny of volcanogenic massive sulfide deposits of Iran. *Ore Geology Reviews*, 95: 974–1007. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.011>
- Ozdemir, A. and Sahinoglu, A., 2018. Important of Gossans in Mineral Exploration: A Case Study in Northern Turkey. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, 4(1): 1–20. <https://doi.org/0.35840/2631-5033/1819>
- Parbhakar-Fox, A., Hunt, J., Lottermoser, B., van Veen, E.M. and Fox, N., 2017. Prediction of Leachate Quality for a Gossan Dump, Angostura, Spain. In: B. Lottermoser (Editor), *Environmental Indicators in Metal Mining*. Springer, Cham, pp. 221–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_13
- Peter, J.M., Goodfellow, W.D. and Doherty, W., 2003. Hydrothermal sedimentary rocks of the Heath Steele Belt, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Part 2. Bulk and rare earth element geochemistry and implications for origin. In: W.D. Goodfellow, S.R. McCutcheon and J.M. Peter (Editors), *Massive Sulphide Deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and Northern Maine, Littleton, CO, Society of Economic Geologists*, pp. 391–415. <https://doi.org/10.5382/Mono.11.17>
- Pivovarov, S., 2001. Adsorption of cadmium onto hematite: temperature dependence. *Journal of Colloid and Interface Science*, 234(1): 1–8. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7235>
- 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(8): 317–335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.016>
- Ritchie, V.J., Ilgen, A.G., Mueller, S.H., Trainor, T.P. and Goldfarb, R.J., 2013. Mobility and chemical fate of antimony and arsenic in historic mining environments of the Kantishna Hills district, Denali National Park and Preserve, Alaska. *Chemical Geology*, 335(6): 172–188. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.10.016>
- Salama, W., Anand, R., Morey, A. and Williams, L., 2019. Supergene gold in silcrete as a vector to the Scuddles volcanic massive sulfides, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 54(8): 207–1228. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00868-6>
- Sangameshwar, S. and Barnes, H., 1983. Supergene processes in zinc-lead-silver sulfide ores in carbonates. *Economic Geology*, 78(7):

- 1379–1397.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.7.1379>
- Scott, K.M., Ashley, P.M. and Lawie, D.C., 2001. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn–Pb–Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 72(3): 169–191.
[https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00159-5)
- Shahraki Ghadimi, A., 2003. Geological Map of Esfandagheh, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Sherlock, R.L. and Barrett, T.J., 2004. Geology and volcanic stratigraphy of the Canatuan and Malusok volcanogenic massive sulfide deposits, southwestern Mindanao, Philippines. *Mineralium Deposita*, 39(1): 1–20.
<https://doi.org/10.1007/s00126-003-0350-7>
- Tashi, M., Mousivand, F. and Ghasemi H., 2017. Cu-Ag Besshi type volcanogenic massive sulfide mineralization in the Late Cretaceous volcano- sedimentary sequence: the case of Garmabe Paein deposit, southeast of Shahrood. *Journal of Economic Geology*, 9(1): 213–233. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V9I1.43062>
- Taylor, G.F., 1987. Gossan and Ironstone Evaluation in Mineral Exploration. Brazilian Geochemistry Society, Rio de Janeiro, 140 pp.
- Törmänen, T.O. and Koski, R.A., 2005. Gold enrichment and the Bi-Au association in pyrrhotite-rich massive sulfide deposits, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, 100(6): 1135–1150.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.6.1135>
- Volesky, J.C., Leybourne, M.I., Stern, R.J., Peter, J.M., Layton-Matthews, D., Rice, S. and Johnson, P.R., 2017. Metavolcanic host rocks, mineralization, and gossans of the Shaib al Tair and Rabathan volcanogenic massive sulphide deposits of the Wadi Bidah Mineral District, Saudi Arabia. *International Geology Review*, 59(16): 1975–2002.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1307789>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilhelm, E.K. and Kosakevitch, A., 1979. Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 2(3): 109–140. Retrieved October 10, 2019 from <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM8120123098>
- Wilmshurst, J.R. and Fisher, N.I., 1983. Classification scheme of gossans. In: R.E. Smith (Editor), *Geochemical Exploration in Deeply Weathered Terrain*. CSIRO Division of Mineralogy, Floreat Park, Western Australia, pp. 104–106. Retrieved October 10, 2019 from <https://books.google.com/books?id=ukNAQAIAAJ>
- Yousefi, S.J., Aftabi, A. and Moradian, A., 2015. Exploration and economic significance of the gossan around Chahar Gonbad copper-gold mine, Sirjan. *Scientific Quaterly Journal, Geosciences*, 24(96): 189–200.
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2015.41747>

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**How to cite this article**

Jahangiri, H., Saadat, S., Mazaheri, S.A., Heidarian Shahri, M.R., Foudazi, M. and Omrani, J., 2021. Geochemistry, Mineralography and Rare Earth Elements Distribution of Gossans related to Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Case Study: Ghaleh-Rigi, Southwest of Jiroft, South of Iran. *Journal of Economic Geology*, 13(3): 537–559. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.86658>



Geochemistry, Mineralogy and Rare Earth Elements Distribution of Gossans related to Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Case Study: Ghaleh-Rigi, Southwest of Jiroft, South of Iran

Hojatollah Jahangiri¹, Saeed Saadat^{2*}, Seyed Ahmad Mazaheri¹, Mohammad Reza Heidarian Shahri¹,
Mohammad Foudazi³ and Jafar Omrani⁴

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Department of Geology and Petroleum Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

3) Department of Geology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

4) Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran

Submitted: Apr. 30, 2020

Accepted: Nov. 08, 2020

Keywords: *Gossan, Volcanogenic Massive Sulfide, Geochemistry, Rare Earth Elements, Jiroft, Iran*

Introduction

Erosion and oxidation of massive sulfides when uplifted and exposed to the surface, commonly lead to the formation of gossans. In this process, surface water will dissolve soluble elements, and oxides and hydroxides of iron (goethite and hematite) will form on top of the volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. The main tectonic settings for Iranian VMS deposits are magmatic arcs, which can be subdivided into volcanic primitive arc, arc/intra-arc rift, and back-arc settings and Sanandaj-Sirjan zone is one of the structural zones that host many VMS deposits in Iran (Mousivand et al., 2018).

The study area is located southwest of Jiroft, Kerman province. The main rock units include vitric tuff, pelagic sediments, volcano-sedimentary rocks, gabbro and intermediate to mafic dykes. Mineralization has occurred in volcano-sedimentary beds. The pelagic sediments which are composed of limestone, shale, sandstone, siltstone and interlayers of pillow lava, are the main hosts for mineralization. Surface oxidation of mineralized zones has led to conversion of primary sulfides to iron oxides and hydroxides to form gossan. This study contributes to mineralogical and geochemical composition and mineralization of gossans to demonstrate how surface oxidation of primary sulfides can play a role in locating VMS mineralization at depth.

Materials and methods

A geological map with a scale of 1:5000 was prepared during field and laboratory studies. Twenty polished section were studied to identify mineral distributions and textures, and some of them were chosen for scanning electron microscopic (SEM) examinations. Fifteen rock samples from the gossan horizons were chosen for geochemical studies. The samples were taken from across the mineralized horizon. Six rock samples were taken from old mining site outcrops to compare the geochemistry of gossans with other surface mineralization. All samples were sent to the laboratory for analysis by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). The rare earth element (REEs) values were measured by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). X-ray diffraction (XRD) spectroscopy was used to identify mineralogy of 30 rock samples. All analyses were performed in the central laboratory of the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, in Tehran and Karaj.

Results

The ore and gangue minerals have massive, layered, disseminated, veinlet, breccia and replacement textures. Based on mineralogy, XRD and SEM studies, the main minerals are

*Corresponding author Email: saeed.saadat@colorado.edu

hematite, goethite, quartz, and jarosite-group minerals. The upper horizon of gossan, with 13 meters thickness has large volume of hematite and goethite minerals. The enrichment of gold, arsenic, antimony, silver, lead and bismuth were observed in this zone. The lower horizon, with a thickness of about 1.5 meters show anomalies of copper and zinc elements. The highest amount of gold and silver were measured about 18.5 and 120 g/ton, respectively. The highest amount of lead element is 1.3 wt.%, which shows a positive correlation with silver variations. The other values are copper 0.16 wt.%, arsenic 0.61 wt.%, bismuth 580 g/ton, and antimony 280 g/ton.

Discussion

Trace and REEs geochemistry are useful in identifying gossans and probable sources (Scott et al., 2001). Geochemical studies also can be used to separate mature from immature gossans. Although the composition of gossans is influenced by early composition of the ore, gossans with high content of Pb (more than 4 wt.%) are usually considered immature. The average Pb measured in the studied gossans is about 2210 g/ton. The Ag content is also low (less than 150 g/ton) and there is a relatively linear relationship between increasing Ag and Pb content. High values of copper often refer to a lower degree of maturity. In the studied gossans, the average amount of Cu is about 2900 g/ton, which is much lower than the immature gossans with average 1.6 wt.%. Therefore, the results of chemical analysis indicate that these gossans are in the category of mature ore bearing gossan.

The REE from La to Lu, is relatively consistent with the shape of REE profiles for volcanogenic massive sulfide mineralization and concurrent massive sulfide gossans (Peter et al., 2003; Volesky et al., 2017; Gieré, 1993). The pattern of distribution of REEs shows small positive Eu enrichment and zoning of precious mineral elements confirms the possibility of orebody under the gossans. Further exploration of volcanogenic

massive sulfide deposits is recommended for this area.

References

- Gieré, R., 1993. Transport and deposition of REE in H₂S-rich fluids: evidence from accessory mineral assemblages. *Chemical Geology*, 110(1–3): 251–268. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90257-J](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90257-J)
- Mousivand, F., Rastad, E., Peter, J.M. and Maghfouri, S., 2018. Metallogeny of volcanogenic massive sulfide deposits of Iran. *Ore Geology Reviews*, 95: 974–1007. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.011>
- Peter, J.M., Goodfellow, W.D. and Doherty, W., 2003. Hydrothermal sedimentary rocks of the Heath Steele Belt, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Part 2. Bulk and rare earth element geochemistry and implications for origin. In: W.D. Goodfellow, S.R. McCutcheon and J.M. Peter (Editors), *Massive Sulphide Deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and Northern Maine*, Littleton, CO, Society of Economic Geologists, pp. 391–415. <https://doi.org/10.5382/Mono.11.17>
- Scott, K.M., Ashley, P.M. and Lawie, D.C., 2001. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn–Pb–Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 72(3): 169–191. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00159-5)
- Volesky, J.C., Leybourne, M.I., Stern, R.J., Peter, J.M., Layton-Matthews, D., Rice, S. and Johnson, P.R., 2017. Metavolcanic host rocks, mineralization, and gossans of the Shaib al Tair and Rabathan volcanogenic massive sulphide deposits of the Wadi Bidah Mineral District, Saudi Arabia. *International Geology Review*, 59(16): 1975–2002. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1307789>