



مقاله پژوهشی

رخساره‌های کانسنگ، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار باریت - روی-سرب-مس ونکان (سوکان)، شمال شرق سمنان

فرزانه پزشکی قره‌چه، فردین موسیوند^{*}، مهدی رضایی کهخانی و فرج‌الله فردوست

گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸

چکیده

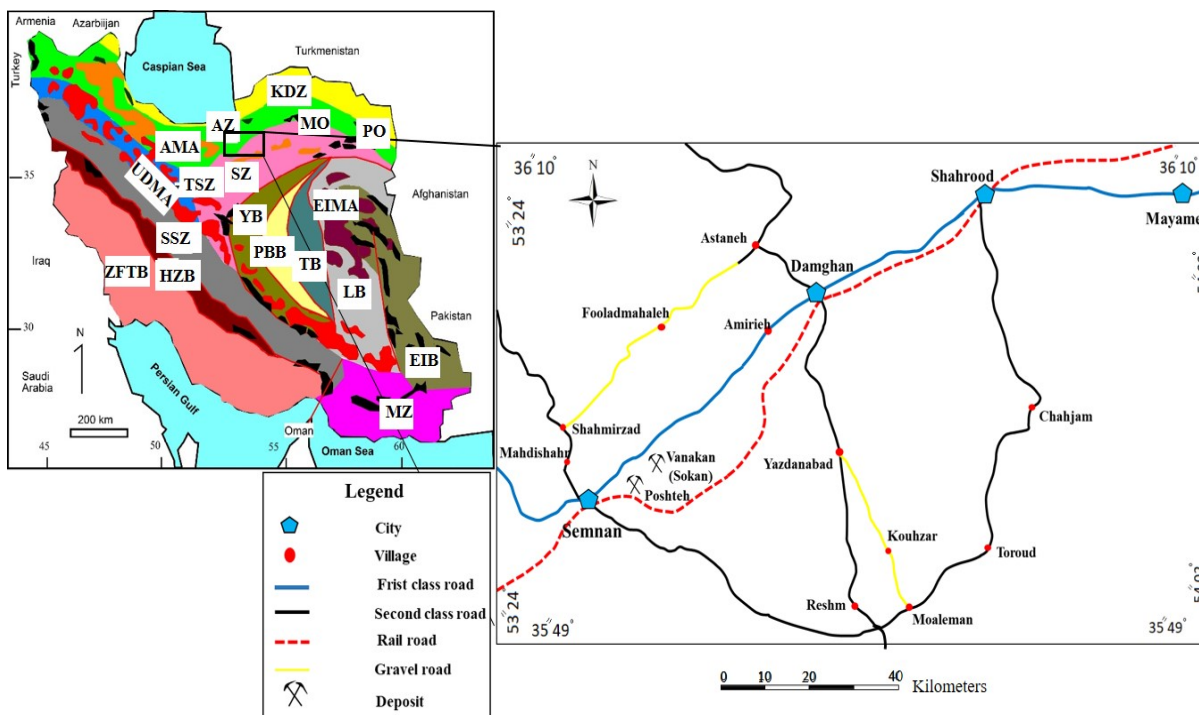
کانسار باریت-روی-سرب-مس ونکان (سوکان) با سنگ میزبان توف، توف‌شیلی، گدازه آندزیتی و تراکی آندزیت به سن ائوسن در شمالی‌ترین بخش از کمربند ماگمایی شمال ایران مرکزی در شمال شرق سمنان واقع شده است. توالی میزبان از پایین به بالا شامل سه واحد سنگی است: (۱) واحد غنی از سنگ‌های رسوبی شامل کنگلومرا، سنگ آهک و ماسه‌سنگ، (۲) واحد غنی از گدازه حاوی سنگ‌هایی با ترکیب حدواسط تا اسیدی، آندزیت و تراکی آندزیت به همراه میان‌لایه‌هایی از شیل و (۳) واحد غنی از توف شامل توف‌های داسیتی، توف ریولیتی و توف‌شیلی. منطقه معدنی ونکان در ناودیس با روند محوری شمال شرقی-جنوب غربی قرار دارد. کانه‌زایی در کانسار ونکان به صورت سه افق کانه‌زایی دیده می‌شود. افق اول و اصلی کانه‌زایی که در یال شمال غربی ناودیس قرار دارد، شامل کانسار ونکان ۱ بوده که از پایین به بالا از پنج رخساره کانه‌دار تشکیل شده است: (۱) رخساره رگه-رگچه‌ای، (۲) کانسنگ سولفید توده‌ای، (۳) کانسنگ باریت لایه‌ای، (۴) کانسنگ لایه‌ای-نواری سولفیدی و (۵) رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی. کانسار ونکان ۲ واقع در یال جنوب شرقی دارای رخساره‌های (۱) رگه-رگچه‌ای و برشی و (۲) نواری رسوبی-برون‌دمی است. بافت ماده معدنی اغلب شامل رگه-رگچه‌ای، توده‌ای، برشی، نواری-لامینه و دانه‌پراکنده است. کانی‌های اولیه و اصلی در ماده معدنی به ترتیب شامل باریت، اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپریت و مارکاسیت و کانی‌های ثانویه مالاکیت، کریزوکولا، گوتیت، لیمونیت، اسمیت‌زونیت و سروزیت هستند. دگرسانی عمده در کانسار ونکان در سنگ دیواره کمربند از نوع کلریتی و سربستی و به مقدار کمتر اپیدوتی، آرژیلیکی و سیلیسی است. طبق پژوهش‌های انجام‌شده، به نظر می‌رسد کانسارهای باریت-فلزات پایه ونکان بر اساس مقایسه با انواع مختلف کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد^۱، بیشترین شباهت را با کانسارهای نوع کوروکو^۲ نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: باریت-روی-سرب-مس، سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، کوروکو، ونکان، سوکان، رخساره کانه‌دار، سمنان

مقدمه

کیلومتری شمال شرق سمنان (گردنه آهوان) واقع شده است (شکل ۱).

کانه‌زایی باریت-روی-سرب-مس ونکان (سوکان) از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری ایران (Aghanabati, 2004) در شمالی‌ترین بخش کمربند ماگمایی شمال ایران مرکزی، در ۲۳



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه ونکان (سوکان) بر اساس نقشه راه‌های کشور. کلمات مخفف شده: ZFTB: کمربند زاگرس چین‌خورده، HZB: کمربند زاگرس بالایی، SSZ: پهنه سهندج-سیرجان، UDMA: مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر، AMA: مجموعه ماگمایی البرز، EIMA: مجموعه ماگمایی شرق ایران، EIB: کمربند شرق ایران، CIM: خرد قاره ایران مرکزی، YB: بلوک یزد، PBB: بلوک پشت‌بادام، TB: بلوک طبس، LB: بلوک لوت، KDZ: پهنه کپه‌داغ، AZ: پهنه البرز، SZ: پهنه سبزوار، TSZ: پهنه تبریز-ساوه، MZ: پهنه مکران، MO: افیولیت‌های مزوزوئیک، PO: افیولیت‌های پالئوزوئیک

Fig. 1. Geographic location and access routes to the Vanakan (Sokan) area, based on the road map of the country. Abbreviations are: ZFTB: Zagros fold-thrust belt, HZB=High Zagros belt, SSZ= Sanandaj-Sirjan zone, UDMA= Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage, AMA: Alborz magmatic assemblage, EIMA: Eastern Iran magmatic assemblage, EIB: Eastern Iran belt, CIM: Central Iranian Microcontinent, YB: Yazd block, PBB: Poshte Badam block, TB: Tabas block, LB: Lut block; KDZ: Kopeh Dagh Zone; AZ: Alborz zone; SZ: Sabzevar zone; TSZ: Tabriz-Saveh zone, MZ: Makran zone, MO: Mesozoic Ophiolites, PO: Paleozoic ophiolites

آتشفشانی، مارنی، آهکی و ماسه‌سنگی انوسن میانی-بالایی در شمال و شمال شرق سمنان، پژوهش‌های زیادی از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی و پترولوژی روی این مناطق انجام شده

به دلیل اهمیت زمین‌شناسی و اقتصادی این کمربند آتشفشانی-رسوبی و وجود توده‌های نفوذی با ترکیب گابرو، گرانودیوریت و گرانیت در سنگ‌های

واحدهای سنگی مختلف شامل انواع کانسنگ و سنگ‌های میزبان و همراه، نمونه‌برداری شد. بررسی‌های بافت و کانی‌شناسی میکروسکوپی بر روی تعداد ۲۴ مقطع نازک- صیقلی و ۸ نمونه صیقلی در آزمایشگاه اپتیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. برای بررسی‌های ژئوشیمیایی زیر افق‌های کانسار کانسار و نکان، تعداد ۱۲ نمونه به صورت نظام‌مند از رخساره مختلف کانسار و پهنه‌های دگرسانی در منطقه برداشت شده است و به روش‌های ICP-MS (۱۰ نمونه) و XRD (۱۰ نمونه) توسط شرکت آریا شیمی شریف مورد آنالیز قرار گرفته است.

زمین‌شناسی

منطقه گردنه آهوان سمنان دارای ویژگی‌هایی است که می‌توان آن را پهنه‌ای حدواسط میان ایران مرکزی و البرز دانست. یکی از ویژگی‌های مهم پهنه ساختاری ایران مرکزی، فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن است که به خصوص در حاشیه شمالی این پهنه از شدت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. پهنه رسوبی-ساختاری البرز نیز شامل بلندی‌های شمال صفحه ایران است که به شکل طاق‌دیس مرکب در یک راستای عمومی شرقی-غربی از آذربایجان تا خراسان امتداد دارد (Aghanabati, 2004). حد جنوبی البرز که مرز بین کمربند ماگمایی البرز و ایران مرکزی است، چندان روشن نیست. ولی چنین به نظر می‌رسد که مرز شاخصی در مرز جنوبی البرز وجود ندارد و گذر از پهنه ایران مرکزی به پهنه البرز تدریجی باشد (Aghanabati, 2004).

در استان سمنان، در دامنه‌های جنوبی بلندی‌های البرز (مرکزی- شرقی) و در حاشیه شمالی کویر بزرگ، گسلی اصلی و بزرگ وجود دارد که در ناحیه جام به نام گسل عطاری نامیده شده و مرز جداکننده کوه‌های البرز و ایران مرکزی در ناحیه جام به شمار می‌آید. با دستیابی به یافته‌های بیشتری از زمین‌شناسی ایران، مشخص شده است که بسیاری از واحدهای سنگ‌چینه‌ای البرز و ایران مرکزی از دیدگاه رخساره و شرایط تشکیل همانند هم هستند. این شباهت بین دو پهنه ساختاری به دلیل برون‌زدهای

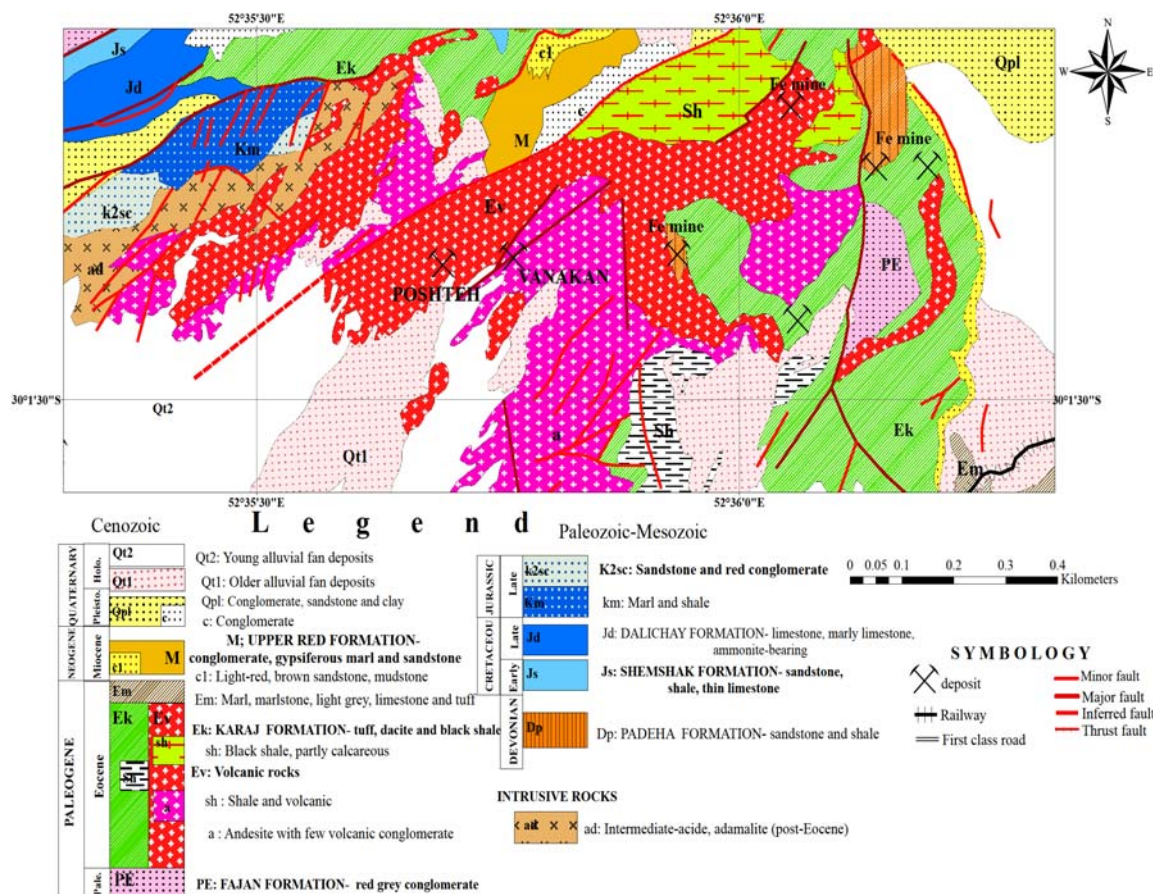
است، از جمله کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد باریت- فلزات پایه پشته سمنان (Ghaffari, 2017)، کانسار آهن اسکارنی همیرد (Haji-Bahrami, 2012)، کانسار آهن اسکارنی در زرتول (Shahri, 2011)، کانسارهای آهن اسکارنی شمال سمنان (Ghiasvand et al., 2009) و همچنین پژوهش‌های پتروگرافی و پتروژنز (Samadi and Moin-Khanehdar, 1998) و بررسی‌های دورسنجی (Kolver, 2017) سنگ‌های شمال سمنان. با توجه به اینکه باریت (سولفات باریم) به همراه فلزات پایه کاربردهای فراوانی در صنعت کشور دارند؛ لذا کشف و استخراج ذخایر جدید از این مواد معدنی ضروری است. از این رو بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر باریت-فلزات پایه در کمربند ماگمایی شمال ایران مرکزی مانند کانسار و نکان می‌تواند موجب ارائه کلیدهای اکتشافی برای کشف ذخایر جدید شود که این امر از اهداف اصلی این پژوهش است. معدن باریت و نکان (سوکان) در ابتدا به صورت یک معدن خاک صنعتی و باریت از سال ۱۳۷۸ فعالیت خود را آغاز کرده و اکتشاف آن به صورت روباز ادامه داشته است. در این کانسار، پس از حفاری ترانشه‌ها و استخراج باریت به صورت روباز، فعالیت‌های معدنی ادامه یافته و در نهایت به بخش سولفید توده‌ای دست یافته‌اند. تاکنون هیچ گونه گمانه اکتشافی و حفاری مغزه‌ای در کانسار و نکان انجام نشده است. در این پژوهش، رخساره‌های کانسنگ، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار باریت-روی-سرب-مس و نکان مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در مورد شباهت‌ها و تفاوت‌های کانسار و نکان با کانسارهای مشابه در جهان و ایران بحث شده است.

روش مطالعه

ابتدا بررسی‌های صحرایی، زمین‌شناسی ناحیه‌ای و محدوده معدنی، تشخیص افق‌های کانسار، پهنه‌های دگرسانی و بررسی روابط بافتی و ساختی و کانی‌شناسی انواع کانسنگ در منطقه معدنی و نکان انجام شد و به صورت نظام‌مند از محل ترانشه‌ها و

جدید شامل واحدهای شیل، ماسه‌سنگ، و دولومیت ژوراسیک، ماسه‌سنگ و آهک مارنی کرتاسه، کنگلومرای پالئوسن، واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن و واحدهای کنگلومرا، آهک و مارن الیگومیوسن هستند که توسط رسوبات تخریبی کواترنری پوشیده شده‌اند (Alavi-Naini, 1997). در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ جام (Alavi-Naini, 1997) واحدهای گدازه‌های آندزیتی و ردیف‌هایی از شیل و سنگ‌های داسیتی و ریولیتی مشاهده می‌شود که هم‌عرض سازند کرج هستند (شکل ۲).

پالئوژئوتیک در منطقه با سنگ‌های ایران مرکزی و برون‌زدهای مزوزوئیک، به‌ویژه تریاس و ژوراسیک که در شمال ناحیه جام دیده می‌شود با سنگ‌های هم‌زمان در کوه‌های البرز است (Alavi-Naini, 1997). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، منطقه معدنی ونکان شامل یک ناودیس بوده که دارای روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است (شکل ۳-B). توالی آتشفشانی رسوبی این ناحیه محدود به سن ائوسن-الیگوسن است که به دلایل فعالیت‌های آتشفشانی-برون‌دمی در داخل یک حوضه کششی در حال فرونشست که همراه با خروج مواد آتشفشانی بوده است، تشکیل شده است. واحدهای سنگی منطقه از قدیم به

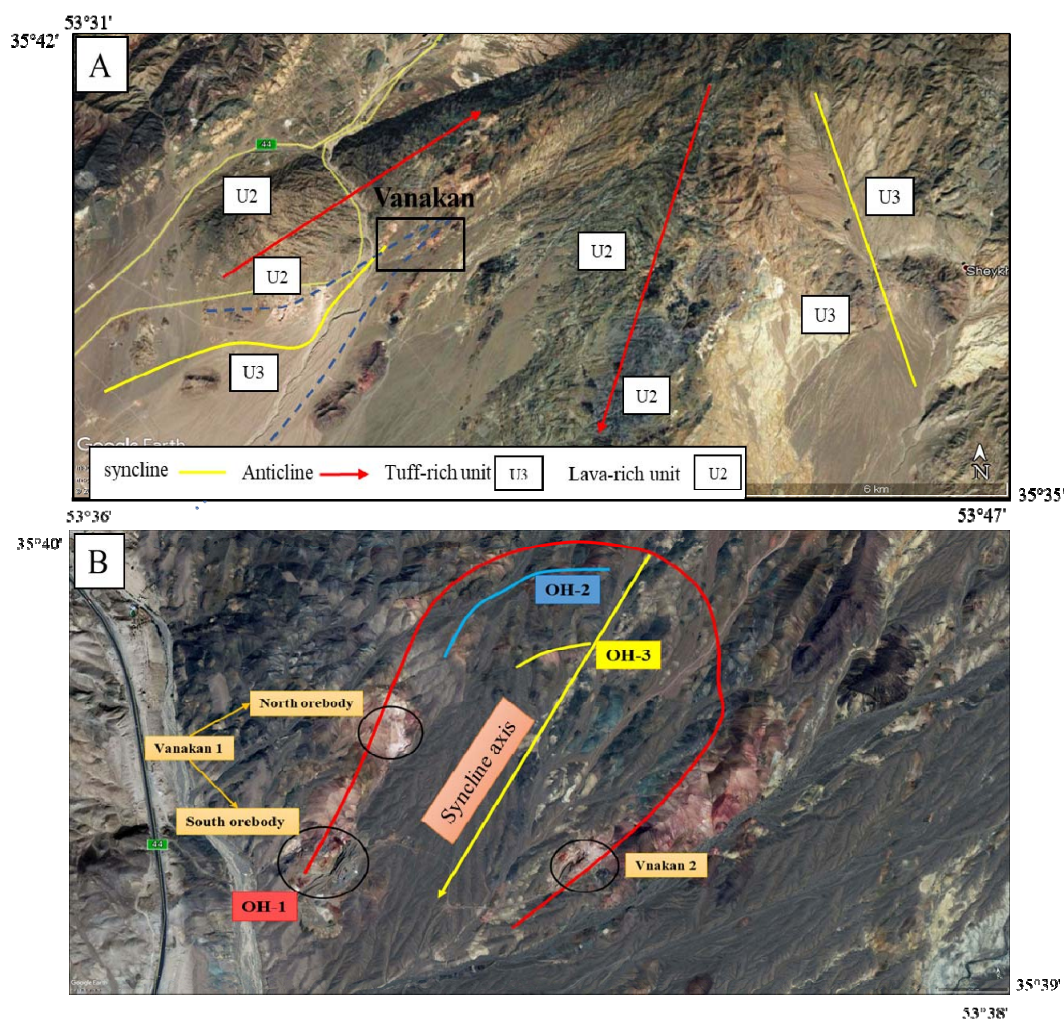


شکل ۲. موقعیت کانسار ونکان (سوکان) و سایر کانسارهای مربوطه در نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه بر اساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان و ۱:۱۰۰۰۰۰ جام از آقانباتی و علوی نائینی (Aghanabati, 2004; Alavi-Naini, 1997).

Fig. 2. Location of the Vanakan (Sokan) and the other related deposits in the simplified geological map of the area. Based on geological maps of Semnan (scale 1:250000) and Jam (scale 1:100000), from Aghanabati, Alavi Naeini (Aghanabati, 2004; Alavi-Naini, 1997).

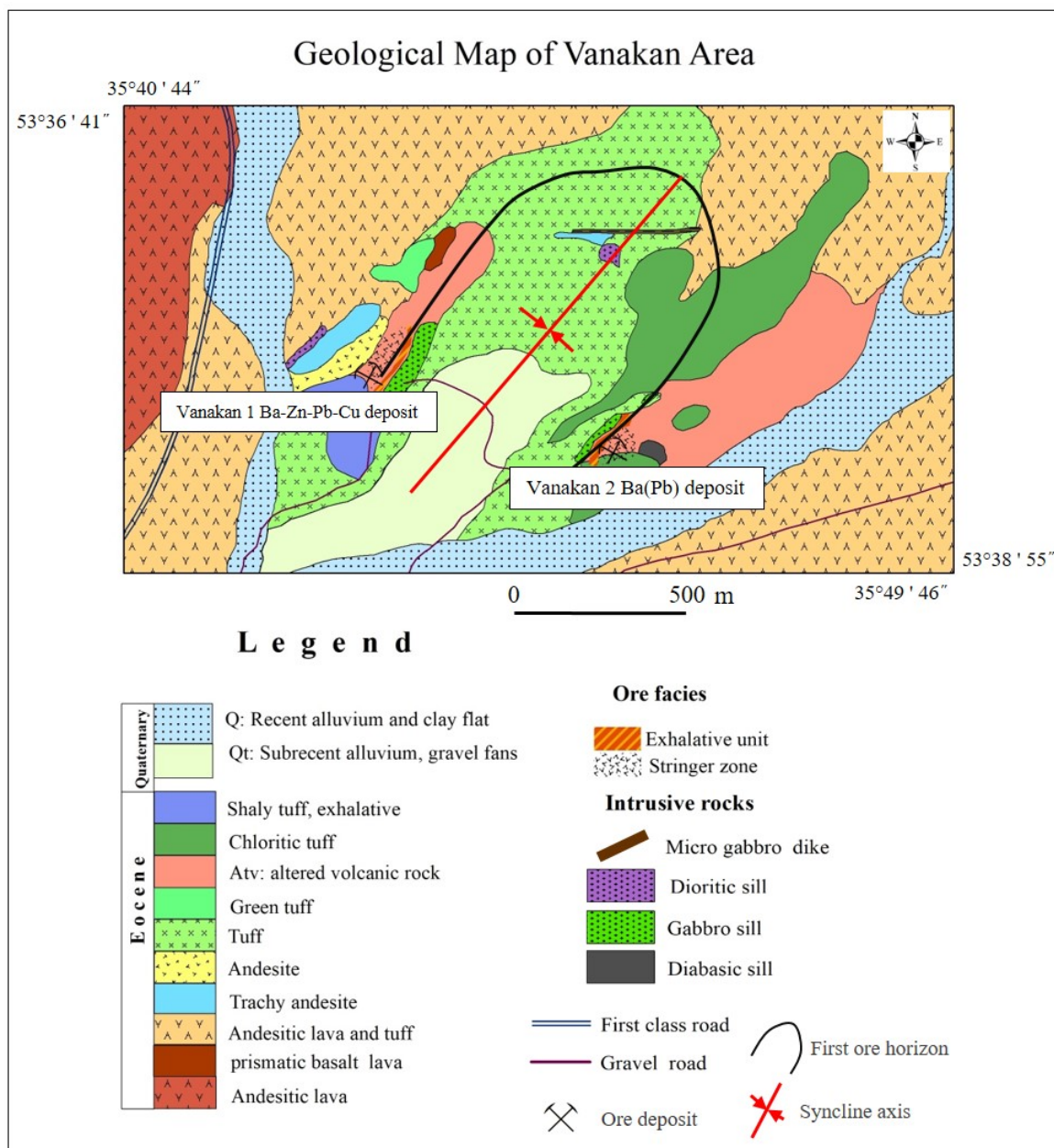
منطقه را از پایین به بالا می‌توان به سه واحد اصلی سنگی تقسیم‌بندی کرد: ۱) واحد رسوبی (U1)، ۲) واحد غنی از گدازه (U2) و ۳) واحد غنی از توف (U3) (شکل ۳-۱). واحد اول در مقیاس ناحیه‌ای در شرق منطقه ونکان رخنمون دارد و در مقیاس منطقه‌ای در محدوده معدنی قابل مشاهده نیست. سنگ میزبان کانه‌زایی شامل توف، توف‌شیلی، گدازه آندزیتی و تراکی آندزیت است (شکل ۴).

این توالی‌های سنگی مورد نفوذ توده‌های نفوذی بعد از ائوسن واقع شده‌اند که گاهی موجب اسکارنزایی آهن نیز شده است (Ghiasvand et al., 2009). به‌طور کلی، سنگ‌های آذرین بخش‌های بزرگی از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ جام را شامل شده‌اند. حضور سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری به همراه میان‌لایه‌هایی از واحدهای رسوبی، بیانگر رخداد فعالیت‌های آتشفشانی در محیط زیردریایی است. طبق بررسی‌های صحرایی، توالی سنگی میزبان به سن ائوسن در



شکل ۳. A: واحدهای اصلی توالی میزبان به همراه طاق‌دیس و ناودیس‌های محلی در ناحیه ونکان (سوکان) و B: گسترش افق‌های کانه دار (OH-1)، (OH-2 و OH-3) در منطقه. کانسار ونکان ۱ در پال شمال‌غربی یک ناودیس و کانسار ونکان ۲ در پال جنوب‌شرقی ناودیس واقع شده است.

Fig. 3. A: The major rock units of the host sequence and the local anticlines and synclines in the Vanakan (Sokan) area, and B: Extension of the ore horizons (OH-1, OH-2 and OH-3) in the area. The Vanakan 1 and 2 locates in the northwest and southeast limbs of a syncline, respectively.



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ترسیم‌شده منطقه معدنی ونکان

Fig. 4. Geological map of Vankan Mining Area

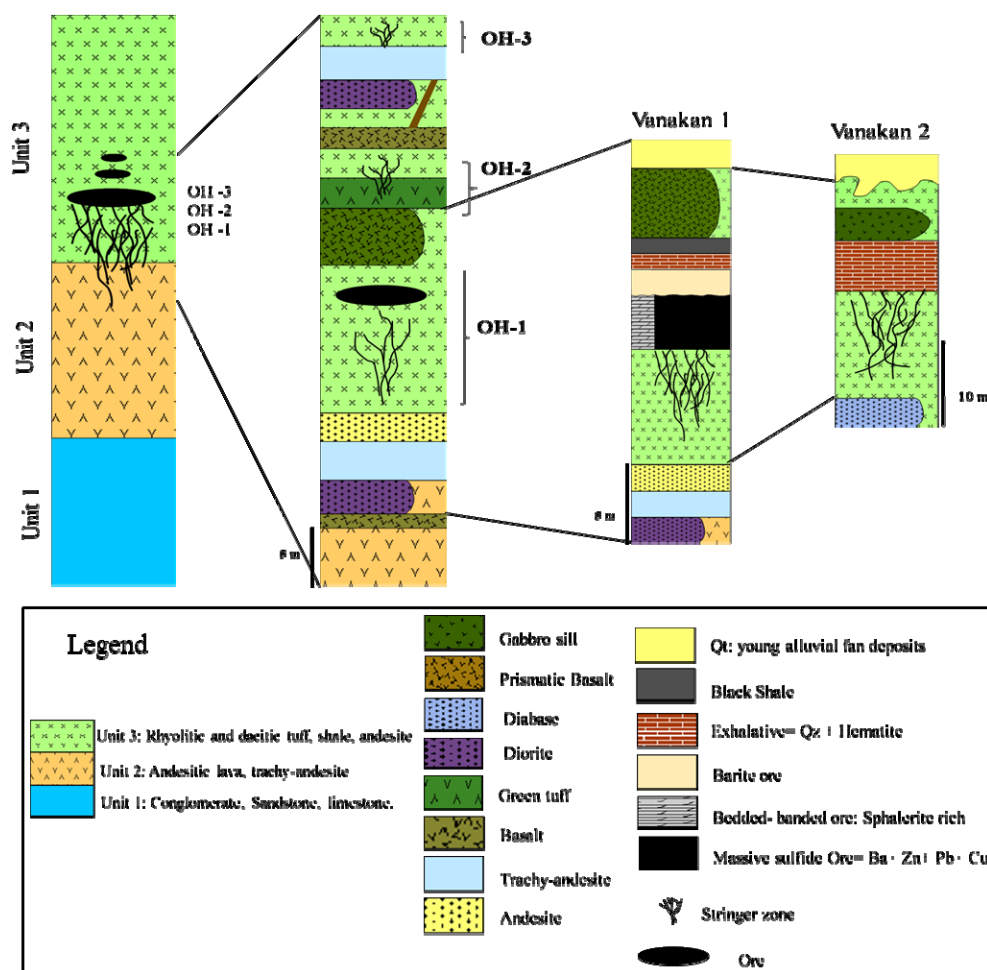
سینه کار شمالی، در یال شمال غربی ناودیس قرار دارد (شکل ۳- B). البته عمده کانه‌زایی در سینه کار اصلی مشاهده می‌شود که بیشتر به صورت سولفیدی بوده و در حال استخراج به صورت روباز است. ادامه افق اول کانه‌زایی در یال جنوب شرقی نیز

کانه‌زایی: افق‌های کانه‌دار و بررسی رخساره‌های کانستک

کانه‌زایی در منطقه معدنی ونکان به صورت کانسارهای ونکان ۱ و ۲ رخ داده است. کانسار ونکان ۱ به صورت سینه کار اصلی و

کانسار ونکان ۱ و سه‌مین کار اصلی استخراج شده است. به‌طور کلی، در محدوده معدنی ونکان سه افق کانه‌زایی قابل تشخیص است. افق اول کانه‌زایی در یال‌های ناودیس مشاهده می‌شود و شامل کانسارهای ونکان ۱ و ۲ است (شکل ۵). در ادامه افق‌های کانه‌دار در کانسار ونکان مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

به‌صورت کانسار ونکان ۲ دیده می‌شود (شکل ۴) که بیشتر حاوی باریت بوده و ذخیره پایینی داشته و به‌صورت محدود استخراج شده است. افق‌های دوم و سوم کانه‌زایی در نزدیکی یال شمال‌غربی و نزدیک به محور ناودیس قرار داشته که دارای کانه‌زایی ضعیف باریت-سولفید رگه-رگچه‌ای است (شکل ۳-B). تاکنون عمده ماده معدنی باریت-روی-سرب-مس از



شکل ۵. ستون چینه‌شناسی عمومی از واحدهای سنگی اتوسن در منطقه شمال‌شرق سمنان و جایگاه افق‌های کانه‌دار در کانسارهای ونکان ۱ و ۲

Fig. 5. General stratigraphic column of Eocene rock units in northeast of Semnan and the position of ore horizons in the Vanakan 1 and 2 deposits

هندسی کلی ماده معدنی در کانسار ونکان ۱ به‌صورت پیکره‌های چینه‌سان هم‌روند با لایه‌بندی سنگ میزبان شیل توفی

رخساره‌های کانسنگی در کانسار ونکان ۱

بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های انجام‌شده، شکل

کلریتی و سربستی و دگرسانی آرژیلیکی ثانویه همراه است. پیریت در این رخساره توسط فرایندهای بعدی دچار هوازدگی شده و تبدیل شدن آن به اکسید-هیدروکسیدهای آهن موجب ایجاد رنگ قرمز تا قهوه‌ای در پهنه استرینگر شده است.

رخساره سولفید توده‌ای

این رخساره که تقریباً در مرکز کانسار قرار دارد، از مهم‌ترین بخش‌های کانسار ونکان است که به صورت عدسی‌شکل تا لایه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷-۷A). رخساره کانسنگ توده‌ای در مقایسه با دیگر رخساره‌های کانسار ونکان، دارای بافت توده‌ای (شکل ۷-۷B) با ماهیتی ناهمگون و چینه‌کران است. میزبان این رخساره، کانسنگ باریتی، توف و شیل‌های سیاه است. از ویژگی‌های شاخص این رخساره در کانسار ونکان این است که در این بخش برخلاف کانسار پشته‌سمنان که دارای کانی‌زایی سولفید توده‌ای غنی از پیریت و کالکوپیریت است (Ghaffari, 2017)، در کانسار ونکان این رخساره دارای کانه‌زایی عمده سولفیدی غنی از اسفالریت، گالن، باریت، و مقادیر کمتری پیریت و کالکوپیریت است (شکل ۷-۷C و D).

علاوه بر این در بخش سولفید توده‌ای دو نسل از کانه‌زایی باریت قابل تشخیص است: نسل اول که دانه‌ریز و به صورت هم‌رشدی به همراه کانی‌های سولفیدی در متن سنگ حضور دارد و نسل دوم باریت که به صورت دانه‌درشت و دانه پراکنده و رگه‌ای در بخش سولفید توده‌ای قابل مشاهده است (شکل ۷-۷D). پدیده جانشین شدن، یکی دیگر از ویژگی‌های این رخساره است که در این بخش کانی کولیت به صورت ثانویه در اثر هوازدگی در اطراف، جانشین اسفالریت‌ها و گالن شده است (شکل ۷-۷C) که به دلیل وجود میزان مس در ساختار این کانی‌ها یا به صورت ادخال است. در برخی موارد دیگر، اسفالریت‌ها در درون خود دارای دانه‌های ریز کالکوپیریت به صورت اکسولوشن^۷ هستند (شکل ۷-۷E).

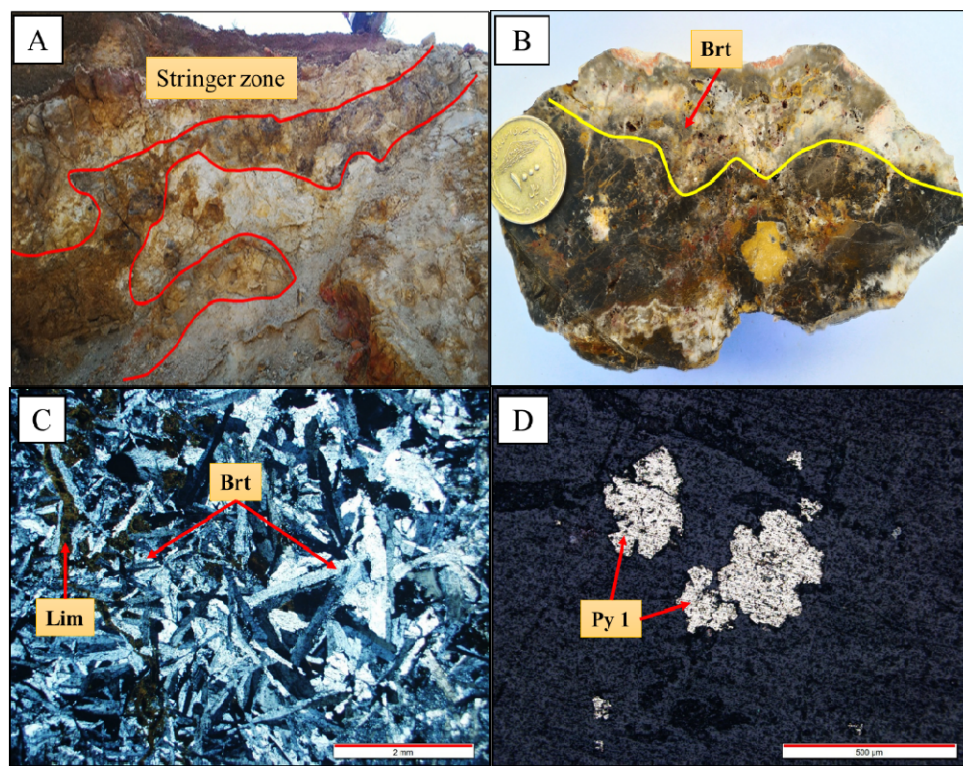
بوده که دارای قسمت ناهمخوان و قطع‌کننده زیرین است. از لحاظ چینه‌شناسی، قسمت لایه‌ای در بالا به سمت مرکز ناودیس (در سمت جنوبی کارگاه استخراجی روباز) و قسمت رگه-رگچه‌ای قطع‌کننده در پایین (در سمت شمالی کارگاه استخراجی روباز) گسترش دارد.

چنان‌که بیان شد، محدوده معدنی ونکان ۱ شامل دو سینه کار است، سینه کار اصلی و سینه کار شمالی. ماده معدنی در کانسار ونکان ۱ در سینه کار اصلی (افق کانه‌زایی اول) دارای ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، توده‌ای، نواری-لایه‌ای، دانه‌پراکنده، برشی و جانیشینی است. کانسار ونکان ۱ بر اساس بررسی‌های انجام‌شده بر روی بخش‌های مختلف از لحاظ ویژگی‌های مختلف کانی‌سازی، ساخت، بافت، کانی‌شناسی و نوع ارتباط با سنگ میزبان از پایین به بالا دارای پنج رخساره اصلی کانه‌دار متفاوت است که عبارتند از: ۱) رخساره رگه-رگچه‌ای و برشی^۱، ۲) رخساره سولفید توده‌ای^۲، ۳) رسوبات لایه‌ای-نواری سولفیدی^۳، ۴) رخساره کانسنگ باریتی^۴ و ۵) رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی^۵.

رخساره رگه-رگچه‌ای

رخساره رگه-رگچه‌ای در کانسار ونکان، دارای گسترش بیشتری بوده و این بخش از کانسار در زیر رخساره سولفید توده‌ای در سنگ‌های گدازه‌ای و توفی قرار گرفته است. این بخش به صورت شبکه‌ای از رگه و رگچه‌های باریتی دیده می‌شود که لایه‌بندی سنگ میزبان را قطع کرده است (شکل ۶-۶A). این رگه-رگچه‌ها نامنظم بوده و بخش عمده آن را کانی باریت تشکیل می‌دهد (شکل ۶-۶C) و بخش خیلی کمتری دارای کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت است (شکل ۶-۶B و D). این رگه-رگچه‌های باریتی سنگ‌های میزبان را در جهت‌های مختلف قطع کرده و گاهی نمایی برشی^۶ در سنگ ایجاد کرده‌اند (شکل ۶-۶A). رخساره رگه-رگچه‌ای و برشی در سنگ میزبان توف‌های کم‌پایین به طور عمده با دگرسانی‌های

- | | |
|----------------------|---------------|
| 1. Stringer zone | 5. Exhalative |
| 2. Massive sulfide | 6. Brecciated |
| 3. Bedded-Banded ore | 7. Exsolution |
| 4. Barite ore | |



شکل ۶. رخساره رگه-رگچه‌ای در کانسار ونکان ۱، A: رگه-رگچه‌های باریتی در سنگ توفی کمرباطین کانسار، B: نمونه دستی از رگه‌ی باریتی، C: کانی‌های تیغه‌ای باریت و لیمونیت ناشی از هوازدگی پیریت در این رگه-رگچه‌های باریتی (در نور XPL) و D: کانی پیریت در این رخساره (در نور PPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Lim: لیمونیت، Py: پیریت).

Fig. 6. Vein-veinlets facies in the Vanakan1 deposit, A: Barite vein-veinlets in the footwall tuff, B: Hand specimen of the barite veins, C: Bladder barite minerals in the vein-veinlets and secondary limonite due to weathering of pyrite (XPL), and D: Pyrite (Py) mineral in this facies (PPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Lim: limonite, Py: pyrite).

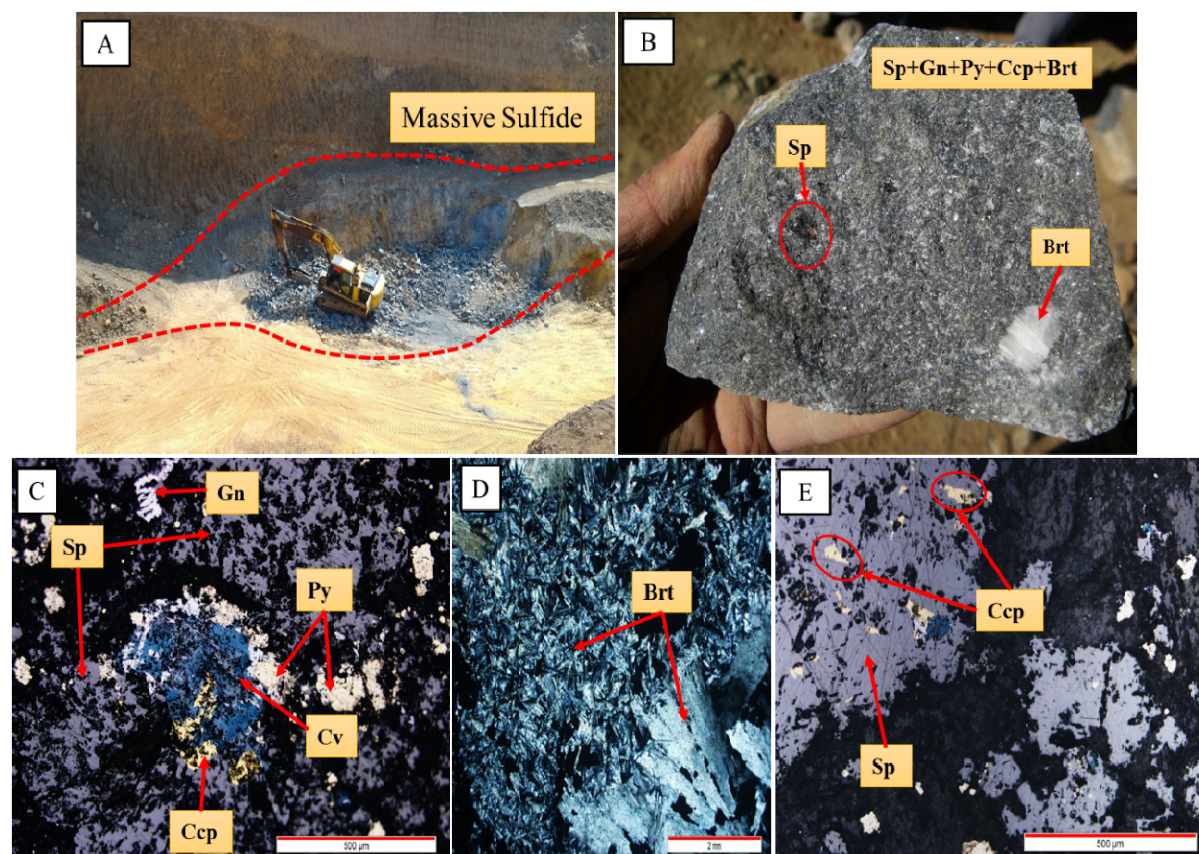
رخساره کانسنگ لایه‌ای-نواری سولفیدی

این بخش از کانسار ونکان ۱ دارای ضخامت کمتری نسبت به رخساره کانسنگ توده‌ای بوده و شامل تناوبی از لایینه‌های متعدد سولفیدی با سنگ میزبان شیلی است. رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی در بالای رخساره سولفید توده‌ای و در کل نسبت به شکل هندسی منطقه معدنی به‌طور هم‌روند و هم‌شیب با لایه‌بندی و چین‌سان است (شکل A-۸). کانی‌های تشکیل‌دهنده این قسمت، شامل اسفالریت، کالکوپیریت، باریت، پیریت و گالن است (شکل A-۸، C و D). سولفیدها اغلب به‌صورت لایینه‌ای، نواری و دانه پراکنده همراه رخ داده‌اند (شکل B-۸).

همچنین در زمینه سنگ شیلی دانه‌ریز میزبان کانی‌های سریست، کوآرتز و کلسیت دیده می‌شوند. ویژگی‌های عمده این رخساره عبارتند از: (۱) حالت عدسی بودن بخش سولفیدی آن و ادامه‌دار نبودن لایینه‌ها و نواری‌های سولفیدی، (۲) سنگ میزبان اغلب دگرسان سریستی شده (شکل A-۸ و ۳) همیافت کانی‌شناسی یکسان آن با قسمت سولفید توده‌ای. این ویژگی‌های می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که این رخساره در زیر کف دریا در اثر نفوذ سیالات کانه‌دار به داخل سنگ توف شیلی میزبان تشکیل شده است. سنگ‌های توف شیلی میزبان به دلیل داشتن فلدسپار و قطعات آتشفشانی، نفوذپذیری بالا و نیز دانه‌ریز بودن

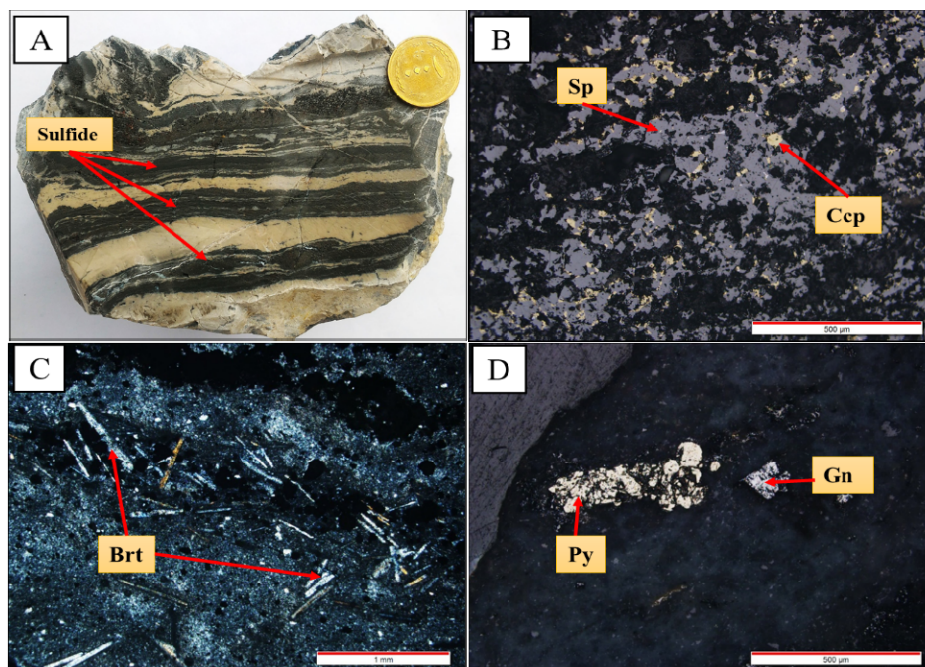
لامینه‌هایی در کانسارهای بوانات (Mousivand et al., 2007)، کانسار باریت-سرب-مس ورنندان کاشان (Hashemi et al., 2015) و کانسار باریت-کائولن و مس پشته سمنان (Ghaffari, 2017) نیز گزارش شده است.

(افزایش سطوح واکنش)، واکنش‌پذیری بالایی داشته و بنابراین با نفوذ سیال به داخل آنها در زیر کف دریا ساخت کانسنگ نواری سولفیدی ایجاد شده که با دگرسانی سریسیتی سنگ میزبان همراه است. به دلیل تحرک بالای عنصر روی، کانی اسفالریت در این بخش بیشتر قابل مشاهده است. چنین



شکل ۷. رخساره سولفید توده‌ای در کانسار ونکان، A: نمایی کلی از رخساره سولفید توده‌ای در حال بهره‌برداری، B: نمونه دستی از کانسنگ توده‌ای که اغلب حاوی کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت و باریت است، C: تصویر میکروسکوپی از هم‌رشدی کانی‌های سولفیدی اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت در رخساره توده‌ای. کوولیت در اثر هوازدگی جانشین کالکوپیریت شده است، D: تصویر میکروسکوپی از کانی باریت به دو صورت دانه‌ریز در زمینه و دانه درشت به صورت پراکنده در متن کانسنگ و E: دانه‌های ریز از کانی کالکوپیریت در متن کانی اسفالریت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney & Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Gn: گالن، Ccp: کالکوپیریت، Brt: باریت، Py: پیریت، Cv: کوولیت).

Fig. 7. Massive sulfide facies in the Vanakan deposit, A: general view of the massive sulfide facies in operation, B: hand specimen of massive ore, mainly containing sphalerite, galena, pyrite, chalcopyrite and barite, C: Microscopic image of intergrowth of sphalerite, galena, pyrite and chalcopyrite. Covellite replaced chalcopyrite due to weathering, D: Microscopic image of barite minerals in two forms, the fine grains in the background and the coarse grains as disseminations within the ore, and E: inclusions of chalcopyrite within sphalerite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: sphalerite, Gn: galena, Ccp: chalcopyrite, Brt: barite, Py: pyrite, Cv: covellite).



شکل ۸. رخساره لایه‌ای- نواری در کانسار ونکان A: نمونه دستی دارای تناوبی از نوارهایی از سنگ میزبان دگرسان‌شده سریسیتی (سفید) و نوارهای غنی از کانی‌های سولفیدی (سیاه); B: نوارهای سولفیدی در تصویر میکروسکوپی بیشتر شامل اسفالریت و به مقدار کمتر کانی‌های کالکوپیریت، C: همراهی نوارهایی از کانی باریت (سفید) حاوی کانی‌های سولفیدی (سیاه) و D: کانی‌های پیریت و گالن به صورت دانه پراکنده در رخساره لایه‌ای- نواری سولفیدی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Gn: گالن، Ccp: کالکوپیریت، Brt: باریت، Py: پیریت).

Fig. 8. Layered-banded sulfide facies in the Vanakan deposit A: Hand specimen involving alternations of the sericite altered host rock bands (white) and sulfide-rich bands (black), B: The sulfide-rich bands in the microscopic image mostly include sphalerite and a minor chalcopyrite and galena, C: Barite-rich band (white) containing sulfide minerals (black), and D: disseminated pyrite and galena in layered-banded ore facies. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: sphalerite, Gn: galena, Ccp: chalcopyrite, Brt: barite, Py: pyrite).

رخساره کانسنگ باریت لایه‌ای

رخساره کانسنگ باریتی به صورت مرز جانشینی بر روی رخساره سولفید توده‌ای قرار دارد (شکل ۹-A و D) و بیان‌کننده نفوذ سیال داغ بعدی به داخل کانسنگ باریتی در زیر و تشکیل کانسنگ سولفید توده‌ای است. این رخساره به طور عمده از باریت تشکیل شده که در قسمت‌های زیرین و برخی قسمت‌ها دارای ساخت برشی با زمینه سولفیدی است (شکل ۹-B و C) که می‌تواند نشان‌دهنده نفوذ فاز دوم گرمایی غنی از سولفید به داخل کانسنگ باریتی باشد. در این بخش اغلب سولفیدها دچار هوازدگی شده‌اند؛ بنابراین به علت خالی ماندن

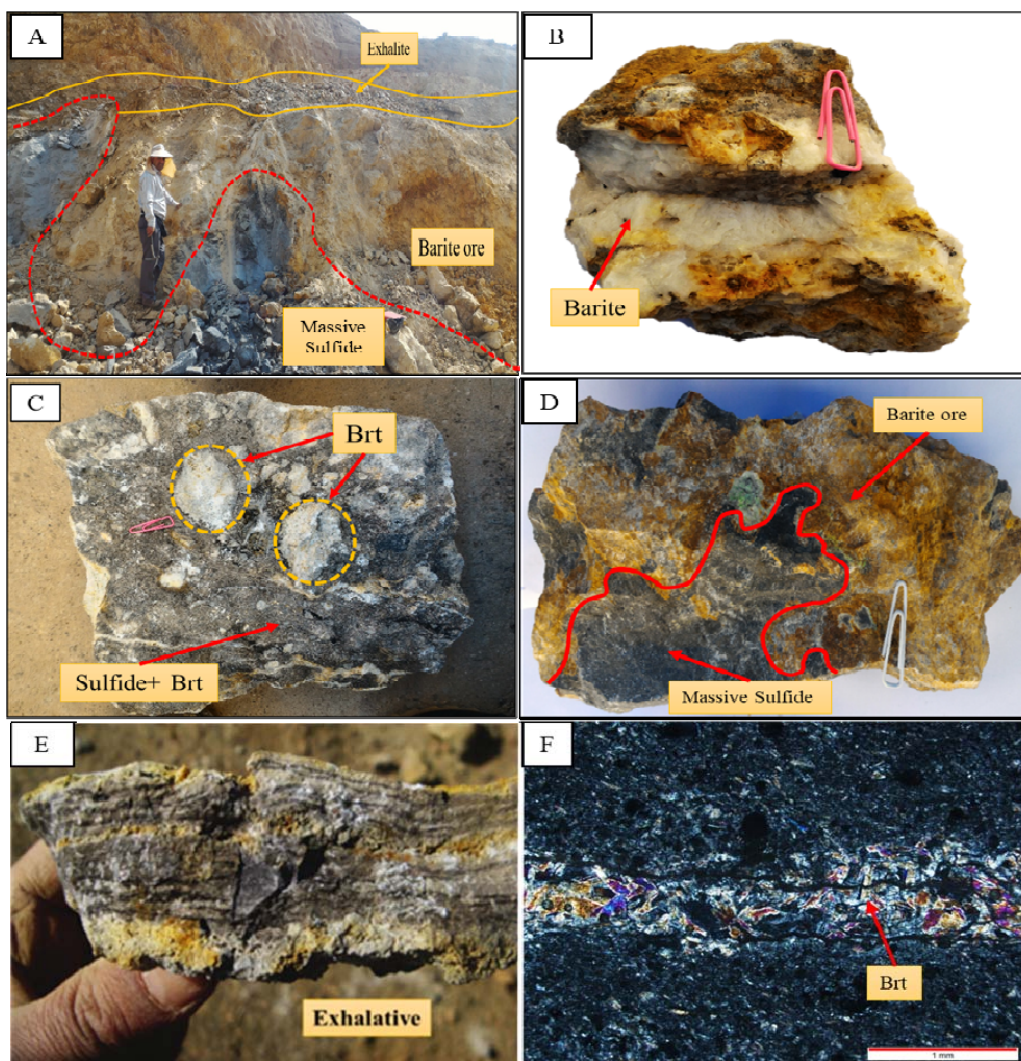
جای سولفیدها، ساختار متخلخل در آن مشاهده می‌شود.

رخساره نواری رسوبی- برون‌دمی

این واحد در بالاترین بخش از کانسار و بر روی کانسنگ باریتی قرار دارد و سنگ میزبان آن توف و شیل است. مرز این رخساره با رخساره کانسنگ باریتی در زیر به صورت تدریجی است؛ به طوری که در زیر به صورت متناوب با لایه‌های باریتی حاصل دیاژنتیک و لایه‌های سنگ میزبان و لایه‌های سولفیدی هوازده شده به همراه چرت‌های حاوی اکسید و هیدروکسیدهای آهن است (شکل ۹-A، E و F). این بخش نشان‌دهنده بالاترین بخش کانسار ونکان است که نشان‌دهنده آرام‌شدن محیط

کانسنگ توده‌ای، کاهش می‌یابد و به صورت سیمای چین‌سان و هم‌روند با لایه‌بندی توف‌ها و شیل توفی میزبان تشکیل شده است.

رسوب‌گذاری و ته‌نشست کانی‌ها در کف دریا و همچنین نشان‌دهنده شرایط رسوبی و اکسیدان‌تر در هنگام تشکیل این لایینه‌هاست (Singer, 1986; Franklin et al., 2005; Gibson et al., 2007) ضخامت این رخساره با دور شدن از



شکل ۹. A: نمایی کلی از رخساره کانسنگ باریتی و رخساره رسوبی-برون‌دمی که در بالای رخساره سولفید توده‌ای قرار دارند، B: نمونه دستی از کانسنگ باریتی، C: بخش برشی واقع در رخساره کانسنگ باریتی که دارای قطعات باریتی با زمینه سولفیدی است، D: نفوذ رخساره سولفید توده‌ای به درون کانسنگ باریتی، E: نمونه دستی از رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی در بالاترین بخش کانسار ونکان ۱ و F: لایینه باریتی در رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی که در اثر دیاژنتیک است. علامت اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت).

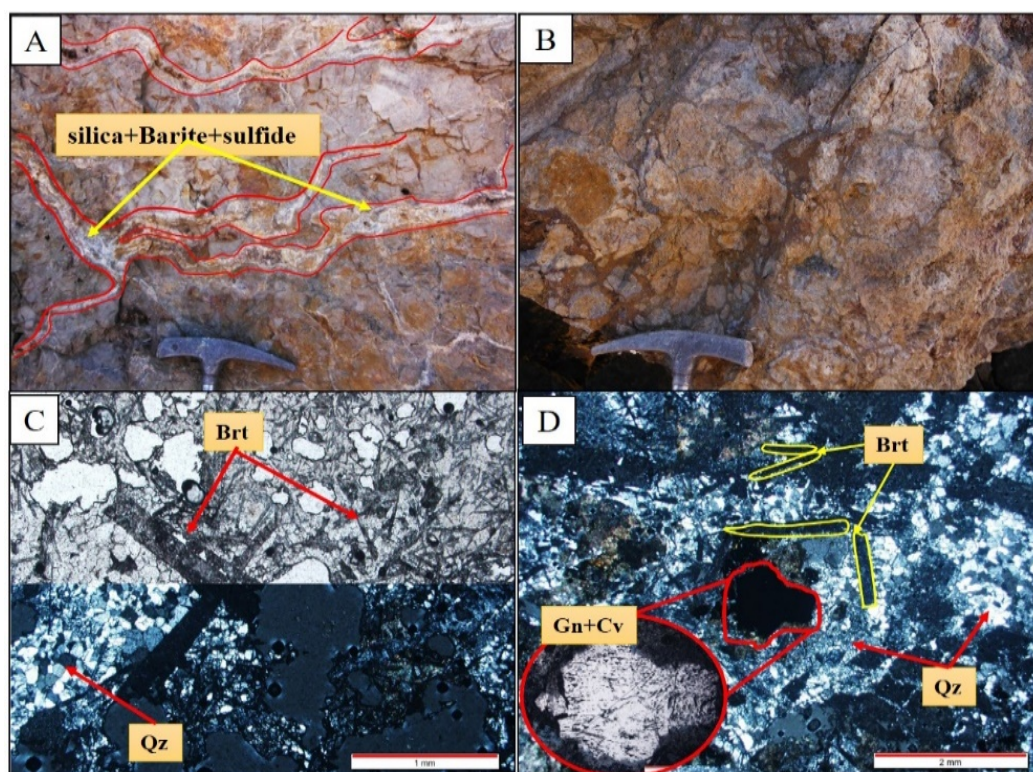
Fig. 9. A: general view of the barite ore and sedimentary-exhalative facies located directly above the massive sulfide facies, B: Handspecimen of the massive barite ore facies, C: The brecciated part of the barite ore facies, as sulfides in the groundmass of barite clasts, D: Penetration of massive sulfide facies into the barite ore, E: Hand sample of the banded sedimentary-exhalative facies in the highest part of the Vanakan 1 ore deposit, and F: Barite lamina in diagenetic banded sedimentary-exhalative facies. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite).

کانسار ونکان ۲

رخساره رگه-رگچه‌ای و برشی

این رخساره دارای گسترش فراوانی در منطقه ونکان ۲ است و برخلاف رخساره رگه-رگچه‌ای در ونکان ۱، حاوی گالن فراوان است. علاوه بر ساخت و بافت رگه-رگچه‌ای، ساخت برشی به فراوانی در این رخساره قابل مشاهده است (شکل A-۱۰).

و B). بیشترین نوع کانی‌ها در این رخساره کانی‌های باریت و گالن بوده (شکل ۱۰-C و D) که به صورت رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده در داخل سنگ میزبان جای گرفته است و اغلب این رگه-رگچه‌های باریتی و سیلیسی، سنگ‌های میزبان را در جهات مختلف قطع کرده‌اند (شکل ۱۰-A).



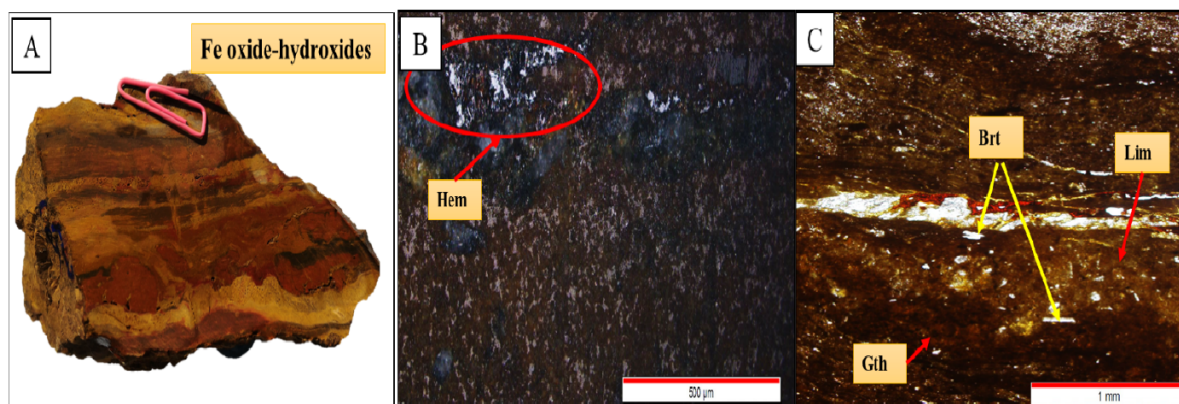
شکل ۱۰. رخساره رگه-رگچه‌ای-برشی در کانسار ونکان ۲، A: رگه‌های باریتی-سیلیسی-سولفیدی در سنگ توفی کمرباین، B: بخش برشی در کانسار ونکان ۲، C و D: تصویر میکروسکوپی از باریت و کوارتز و گالن به همراه کوولیت ثانویه در این رگه-رگچه‌ها. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gn: گالن، Brt: باریت، Qz: کوارتز، Cv: کوولیت).

Fig. 10. Vein- veinlets facies in vanakan 2 deposit, A: Barite-quartz-sulfide veins in the footwall tuff, B: breccia part in Vanakan 2 deposit, C and D: Microscopic image of the Veins –veinlets containing barite, quartz, galena and secondary covellite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Gn: galena, Brt: barite, Qz: quartz, Cv: covellite).

رخساره رسوبات نواری- برون‌دمی

این رخساره در منطقه ونکان ۲ دارای گسترش بسیار زیادی است و دارای تناوبی از چرت‌های حاوی اکسید و هیدروکسیدهای فراوان آهن در سنگ میزبان توفی است (شکل

۱۱-A). این واحد چرتی نواری قرمز بر روی رخساره رگه-رگچه‌ای قرار دارد. بیشتر کانی‌های موجود در این رخساره شامل اکسید و هیدروکسیدهای آهن از جمله هماتیت اولیه به همراه باریت است (شکل ۱۱-B و C).



شکل ۱۱. A: رخساره ذواری رسوبی-برون‌دمی در کانسار ونکان ۲ شامل نوارهای چرتی غنی از اکسید-هیدروکسیدهای آهن، B: تصویر میکروسکوپی از هماتیت اولیه در این رخساره و C: تصویر دانه‌های پراکنده باریت و نیز کانی‌های ثانویه آهن از جمله لیمونیت، گوئیت و هماتیت در این رخساره. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Hem: هماتیت، Gth: گوئیت، Lim: لیمونیت، Brt: باریت).

Fig. 11. A: banded sedimentary-exhalative facies involving iron oxide- hydroxides-rich cherty bands in the Vanakan 2 ore deposit, B: Microscopic image of the primary hematite in this ore facies, and C: Image of dispersed grains of barite and secondary iron oxide-hydroxides minerals including limonite, goethite and hematite with this facies. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Hem: hematite, Gth: goethite, Lim: limonite, Brt: barite).

کانی‌شناسی

کانی‌های معدنی اولیه و اصلی در کانسار ونکان بیشتر شامل اسفالریت، گالن، باریت، پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه به‌طور عمده شامل کولیت، کالکوسیت، دیژنیت، اسمیت-زونیت، سروزیت، مالاکیت، کریزوکولا و اکسید-هیدروکسیدهای آهن هستند. کانی‌های باطله اغلب شامل سریسیت، کوارتز، کلریت، فلدسپار و کلسیت است. رخساره رگه-رگچه‌ای اغلب حاوی باریت و کانی‌های سولفیدی است. همچنین کانی‌های موجود در رخساره سولفید توده‌ای و رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی عبارتند از: اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت و باریت. واحد چرتی آهن‌دار در توالی معدنی نیز اغلب دارای هماتیت اولیه به همراه باریت و اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن مثل لیمونیت و هماتیت است. با توجه به بررسی‌های کانی‌شناسی و ساختار و بافت کانی‌ها و مطالعه دقیق ارتباط کانی‌های معدنی و سنگ‌ساز، توالی همیافتی کانی‌ها برای کانسار ونکان رسم شده است (شکل ۱۲).

انواع دگرسانی و پهنه‌بندی آنها

مناطق دگرسانی در کانسار ونکان به‌صورت قابل توجهی در منطقه قابل مشاهده است که اهمیت زیادی در اکتشاف خواهد داشت. بخش کمرباین یا پهنه رگه-رگچه‌ای بیشترین میزان دگرسانی در سنگ میزبان را نشان می‌دهد که اغلب دارای دگرسانی‌های کلریتی، سریسیتی، اپیدوتی، کربناتی و آرژیلیکی است. البته دگرسانی آرژیلیک به‌صورت ثانویه در اثر هوازدگی بر روی دگرسانی سریسیتی ایجاد شده است؛ زیرا این دگرسانی تنها در قسمت‌های سطحی گسترش داشته و همراه آن اکسید-هیدرواکسیدهای ثانویه آهن دیده می‌شود. در اثر شدت دگرسانی، رنگ سنگ‌ها به سبز، سفید، کرم و زرد تغییر پیدا کرده‌اند (شکل ۱۳-A و B). در درون پهنه دگرسانی سریسیتی رگه و نوارهای باریتی و کوارتز نیز به چشم می‌خورد که بدون سولفید است (شکل ۱۳-E). دگرسانی سریسیتی با انحلال کامل کانی‌هایی مثل فلدسپار و خارج شدن کاتیون‌های Cu، Mg و Na و باقی ماندن کاتیون K، در سیستم و تشکیل کانی سریسیت (مسکویت دانه‌ریز) تشکیل می‌شود (Franklin).

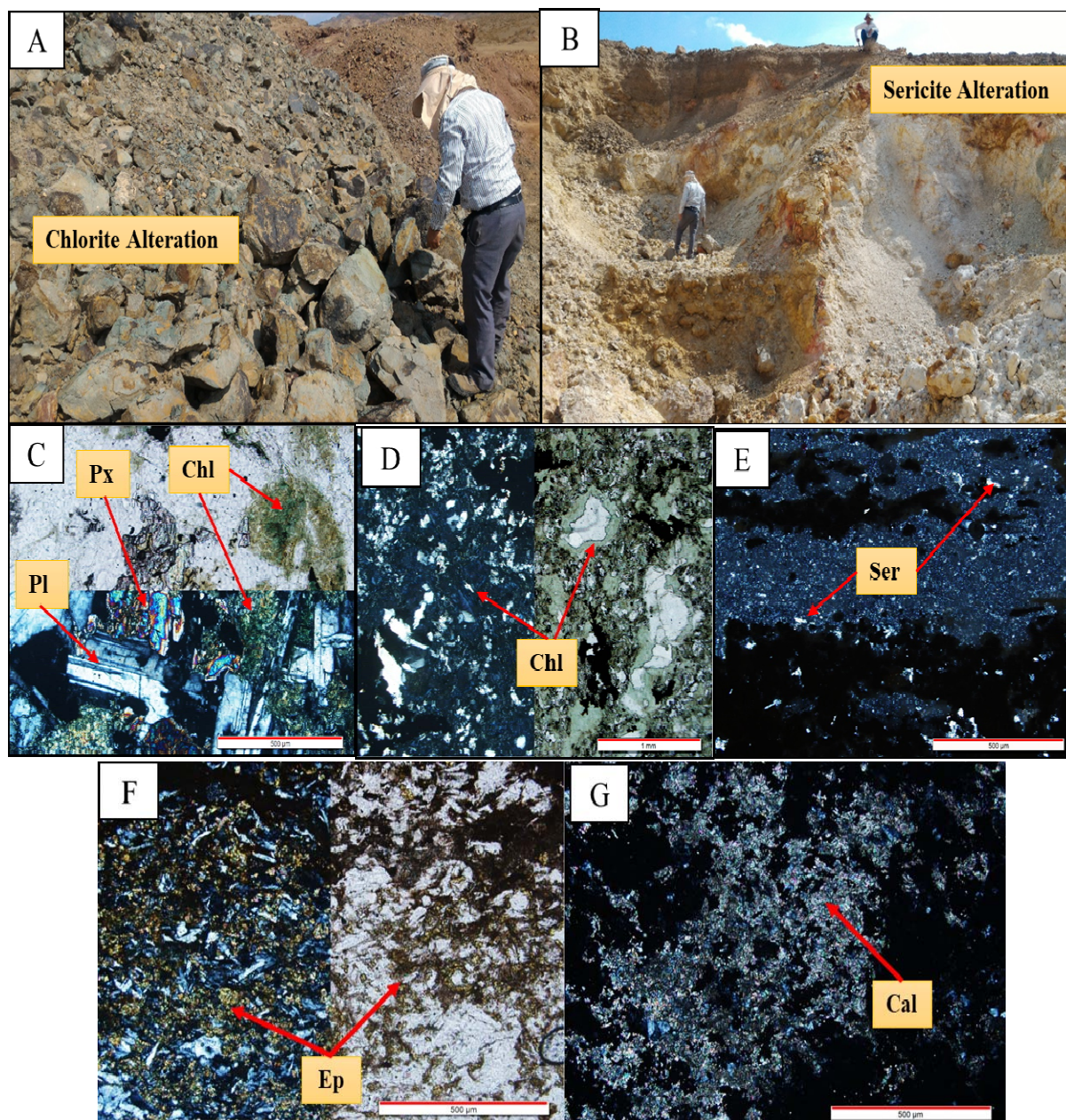
ونکان و بیشتر در بخش کمرباین کانسار دیده می‌شود (شکل ۱۳-F). دگرسانی کربناته نیز در سنگ میزبان توفی نیز دیده می‌شود که بیشتر به صورت رخداد کانی کلسیت است (شکل ۱۳-G). به طور کلی می‌توان گفت کانی اپیدوت محصول دگرسانی گرمابی کانی‌های مافیک در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌هاست. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، یک پهنه‌بندی آشکار برای انواع دگرسانی‌ها در کانسار ونکان قابل تشخیص است (شکل ۱۳). به طور کلی از مرکز سیستم دگرسانی در کانسار ونکان به سمت حاشیه‌ها و کمربالا و کمرباین، در ابتدا دگرسانی سریستی (و آرژیلیکی ثانویه) و سپس دگرسانی کلریتی گسترش دارند.

et al., 2005). دگرسانی سریستی کم‌بیش در بخش رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی، واحدهای کمرباین، کمربالا، میزبان ماده معدنی و توده نفوذی در کانسار ونکان مشاهده می‌شود. این دگرسانی در واحد توفی میزبان قابل مشاهده است (شکل ۱۳-E) و البته نتایج XRD نیز وجود سریست را تأیید می‌کند. دگرسانی کلریتی در پایین‌ترین بخش از کانسار و همچنین در سیل گابرویی در بخش کمربالا نیز مشهود است (شکل ۱۳-A، C و D). بنا به نظر بارنز (Barnes, 1997) کلریتی شدن یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در اثر محلول‌های گرمابی غنی از Fe و Mg ایجاد می‌شود و در اثر این فرایند، سنگ ظاهری سبزرنگ پیدا می‌کند. دگرسانی اپیدوتی نیز در محدوده معدنی

Mineral		Volcanic- Exhalative							Supergene/ Weathering
		Stage-1			Stage-2		Stage-3	Diagenesis	
		Stringer zone	Layered Barite	Exhalite	Massive sulfide	Bedded- Banded ore	Vein- breccia barite		
Minerals	Barite 1								
	Barite 2								
	Sphalerite 1								
	Sphalerite 2								
	Galena 1								
	Galena 2								
	Chalcopyrite 1								
	Chalcopyrite 2								
	Pyrite 1								
	Pyrite 2								
	Pyrite 3								
	Pyrite 4								
	Marcasite								
	Hematite								
	Covellite								
	Digenite								
	Chalcocite								
Malachite									
Chrysocolla									
Smithsonite									
Cerussite									
Limonite									
Goethite									
Alteration	Sericite								
	Chlorite								
	Quartz								
	Clay mineral								
Textures and structures	Vein- veinlets								
	Brecciated								
	Massive								
	Bedded and laminated								
	Disseminated								
	Colloform								
	Replacement								
	Ring structures								

شکل ۱۲. توالی پاراژنتیک کانی‌ها و ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار ونکان

Fig. 12. Paragenetic sequence of minerals and ore textures and structures in the Vanakan deposit



شکل ۱۳. A: دگرسانی کلریتی در کمربین کانسار ونکان، B: دگرسانی سریستی که در مرکز سیستم قرار دارد و بخش وسیعی را در برمی گیرد، C: دگرسانی کلریتی در سیل گابرو که حاوی کانی پلاژیوکلاز و پیروکسن است، D: دگرسانی کلریتی در سنگ میزبان توفی، E: دگرسانی سریستی در سنگ میزبان توفی، F: دگرسانی اپیدوتی و G: دگرسانی کربناته به صورت رخداد کانی کلسیت در سنگ‌های کمربین. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Ser: سریست، Px: پیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Cal: کلسیت، Ep: اپیدوت).

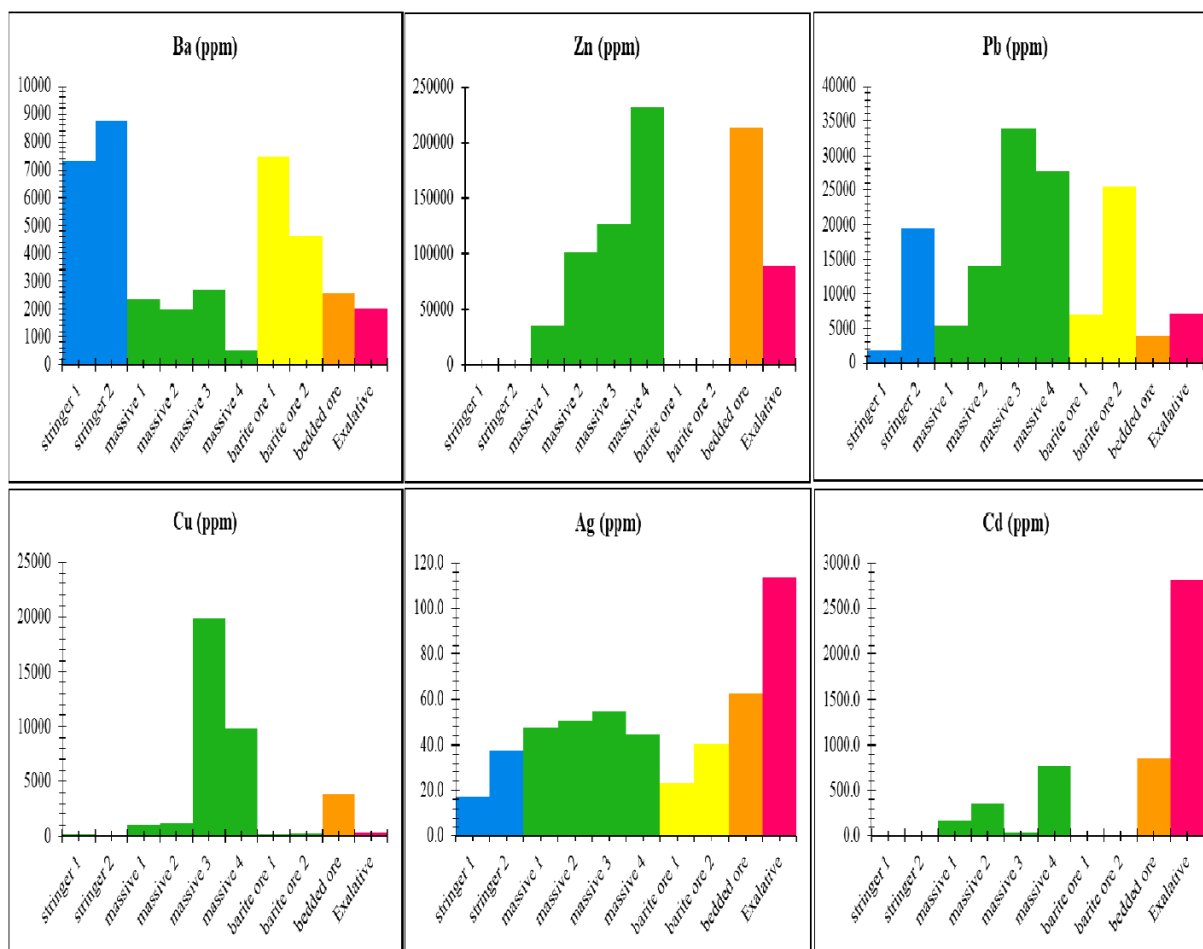
Fig. 13. A: Chlorite alteration in the footwall of the Vanakan ore deposit, B: sericite alteration located at the center of the system, covered a large area, C: Chlorite alteration in the Gabbro sill containing mineral plagioclase and pyroxene, D: Chlorite alteration in tuffaceous host rock, E: sericite alteration in the tuffaceous host rock, F: Epidote alteration, and G: Carbonate alteration as calcite formation in the footwall rocks. . Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: chlorite, Ser: sericite, Px: pyroxen, Pl: plagioclase, Cal: calcite, Ep: epidote).

(Shikazono et al., 2008) بوده است. برای تغییرات میزان

عناصر اصلی در رخساره‌های مختلف کانسار ونکان ۱، عناصر Cu, Pb, Zn, Ba, Cd مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، دو نمونه از رخساره رگه-رگچه‌ای، چهار نمونه از رخساره سولفید توده‌ای، دو نمونه از رخساره کانسنگ باریتی و از رخساره‌های لایه‌ای-نواری سولفیدی و نواری رسوبی-برون‌دمی، هر کدام یک نمونه آنالیز شد و نتایج پردازش داده‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است.

ژئوشیمی رخساره‌های کانسار

برای بررسی ژئوشیمیایی رخساره‌های کانسار ونکان، تعداد ۱۰ نمونه به صورت نظام‌مند از داخل ترانشه، کمرباین و کمربالا و رخساره‌های کانسار مختلف کانسار ونکان ۱ برای اندازه‌گیری عناصر اصلی برداشت شد و به روش ICP-MS توسط شرکت آریا شیمی شریف مورد آنالیز قرار گرفت. بررسی ژئوشیمیایی افق‌های کانسار در کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مورد توجه بسیاری از پژوهشگران مانند شیکازونو و همکاران و رابرت و همکاران (Robert et al., 2008;



شکل ۱۴. تغییرات فراوانی باریت، مس، نقره و کادمیم در رخساره‌های کانسنگ مختلف کانسار ونکان ۱

Fig. 14. Changes in amounts of barium, zinc, lead, copper, silver and cadmium in different ore facies of the Vanakan 1 ore deposit

میزان باریم به ترتیب از پایین به بالا در رخساره‌های رگه-رگچه‌ای و کانسنگ باریتی بیشترین مقدار را نشان می‌دهد که دلیل آن ته‌نشست مقادیر زیاد باریم در مرحله اول کانه‌زایی (شکل ۱۲) است. عنصر روی بیشترین مقدار را در رخساره سولفید توده‌ای (یعنی تا بیش از ۲۳ درصد وزنی) و سپس در رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی (بیش از ۲۱ درصد وزنی) دارد که به دلیل تشکیل هر دو رخساره در یک مرحله (مرحله دوم کانه زایی، شکل ۱۲) و توسط یک سیال است. بیشترین مقادیر عنصر سرب نیز مربوط به رخساره سولفید توده‌ای (بیشتر از ۳ درصد) و رخساره کانسنگ باریتی (تا بیش از ۲/۵ درصد) است. میزان عیار مس در کانسار و نکان ۱، بیشترین مقدار را در رخساره سولفید توده‌ای (تا بیش از ۱/۹ درصد) و سپس رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی دارد که با توجه به شباهت کانی‌شناسی سولفیدی در این رخساره، به نظر می‌رسد تشکیل آنها مربوط به یک مرحله (مرحله دوم، شکل ۱۲) و یک سیال غنی از فلزات پایه بوده است. بیشترین میزان عیار نقره مربوط به رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی (۱۱۳/۸ ppm) است. عنصر کادمیم نیز در این رخساره بیشترین مقدار را دارد. بیشترین مقادیر عناصر نقره و کادمیم در رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی می‌تواند به دلیل میزان تحرک بالای این عناصر باشد (Barnes, 1997) و موجب شده است این فلزات بیشتر در کف دریا ته‌نشست شوند. تمام تغییرات عناصر بیان شده به صورت نمودار ستونی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

الگوی تشکیل

بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی، شکل هندسی ماده معدنی، ساخت و بافت، رخساره‌های کانه‌دار، کانی‌شناسی و دگرسانی، می‌توان مراحل زیر را برای تشکیل و تحول کانسار و نکان در نظر گرفت:

مرحله آتشفشانی-برون‌دمی

ویژگی‌های کانه‌زایی باریت-فلزات پایه در کانسار و نکان از جمله رخداد به صورت پیکره‌های عدسی و لایه‌ای شکل

همخوان و هم‌روند با لایه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی میزبان، رخداد کانه‌زایی در افق و زیر افق‌های خاص از توالی آتشفشانی-رسوبی و نیز نوع رخساره‌های کانه‌دار و موقعیت قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر، ساخت و بافت‌های سولفید توده‌ای، نواری و رگه-رگچه‌ای، نوع و محل گسترش دگرسانی‌ها در این کانسار، همگی می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل کانسار به صورت آتشفشانی-رسوبی در محیط زیردریایی به صورت کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان زاد باشد (Franklin et al., 2005). بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آندزیتی-بازالتی منطقه گردنه آهوان نشان‌دهنده ماهیت کالک-آلکال و محیط کمان آتشفشانی حاشیه قاره هستند (Ghaffari, 2019; Pezeshki, 2017). ضمن اینکه بسیاری از پژوهشگران محیط زمین‌ساختی تشکیل سنگ‌های آتشفشانی کمر بند ماگمایی شمال ایران مرکزی را از نوع کمائی دانسته‌اند (Alavi, 2015; Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 1991). به دلیل ماهیت آتشفشانی-رسوبی توالی میزبان در منطقه به نظر می‌رسد محیط تشکیل توالی میزبان و کانه‌زایی یک محیط کشتی ریفی درون کمائی باشد. بنابراین، بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، چنین استنباط می‌شود که ایجاد محیط کشتی درون کمائی و توسعه محیط آتشفشانی-رسوبی زیردریایی و بالا بودن شار حرارتی ناشی از وجود توده‌های نیمه عمیق هم‌زمان با آتشفشان که نقش موتور حرارتی داشته‌اند، موجب ایجاد و گسترش سامانه‌های همرفتی گرمایی در طول گسل‌های هم‌زمان با آتشفشان و رسوب‌گذاری شده است؛ به طوری که آب‌های سرد و شور دریا از طریق این گسل‌های اولیه به اعماق زیر کف مهاجرت کرده و بعد از گرم شدن تبدیل به سیال شور گرمایی شده‌اند. سپس این سیالات داغ و شور، فلزات و اجزای کانه‌ساز را از سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کمرپایین شسته و ضمن دگرسان کردن این سنگ‌ها به بالا مهاجرت کرده و از طریق گسل‌های اولیه به صورت برون‌دمی وارد کف دریا شده‌اند. ورود این سیالات داغ غنی از فلز به آب دریای سرد موجب ته‌نشست مواد معدنی به صورت کانسارهای

سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد شده است. نهشته‌های چرتی آهن‌دار در توالی کانسار همان رسوبات گرمابی-برون‌دمی (Grenne and Slack, 2005) هستند.

به‌طور کلی، مرحله آتشفشانی-برون‌دمی به‌صورت سه فاز کانه‌زایی به شرح زیر رخ داده است:

فاز اول

(۱) **تشکیل رخساره رگه-رگچه‌ای (چینه‌کران):** تشکیل رخساره رگه-رگچه‌ای اولیه مربوط به سیالات با دمای کم و عمق نفوذ پایین است. بر اساس بررسی سیالات درگیر این فاز از کانه‌زایی دمای زیر ۲۰۰ درجه (حداکثر ۱۹۵ درجه) داشته است (Pezeshki, 2019). طبق نظر بارنز (Barnes, 1997) سیلیس در دمای بالای ۶۰ درجه قابلیت انحلال دارد، به‌خصوص در pH بالا این حلالیت افزایش می‌یابد. سیالات کانه‌ساز از طریق گسل‌های هم‌زمان با آتشفشان و رسوب‌گذاری بالاآمده و در اثر مخلوط‌شدگی با آب دریا، سردشدگی و تغییر در Eh و pH موجب کانی‌سازی در رخساره رگه-رگچه‌ای شده است. در این رخساره همیافت کانیایی اغلب شامل باریت و مقدار کمتری پیریت است.

(۲) **تشکیل رخساره کانسنگ باریت لایه‌ای (چینه‌سان):** به‌موازات تشکیل رخساره رگه-رگچه‌ای، ورود سیالات کانه‌ساز غنی از باریم و سیلیسیم به کف دریا موجب ته‌نشست کانسنگ باریتی و سپس نهشته‌شدن رسوبات نواری-برون‌دمی و چرتی آهن‌دار شده است. رخساره کانسنگ باریتی اغلب کانی تشکیل‌دهنده این رخساره باریت است. البته این رخساره در کانسار ونکان ۲ دیده نمی‌شود.

(۳) **تشکیل رخساره نواری رسوبی-برون‌دمی:** با ته‌نشست کانسنگ باریتی و غلبه آب دریای اکسیدان، به‌تدریج رسوبات چرتی آهن‌دار به‌صورت نواری بر روی کانسنگ باریتی نهشته می‌شوند.

فاز دوم

در این فاز از کانه‌زایی، با توجه به میزان بالای کالکوپیریت،

سیالی با دمای بالاتر و غنی از فلزات سرب، روی و مس که دارای عمق نفوذ زیادتر و شرایط احیایی تری دارد و غنی از HS^- و Cl^- برای حمل کانه‌های فلزی از جمله روی، سرب و به‌ویژه مس بوده است، در زیر کف دریا به درون رخساره‌های قبلی شامل رخساره‌های کانسنگ باریتی و رسوبی-برون‌دمی نفوذ کرده و آنها را جانشین کرده است که خود به‌صورت مراحل زیر است:

(۱) **تشکیل رخساره سولفید توده‌ای:** در مرحله تشکیل این کانسنگ، سیال داغ از زیر به درون رخساره کانسنگ باریتی نفوذ کرده و آنرا جانشین کرده است. کانی‌های موجود در این رخساره شامل باریت، اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت است.

(۲) **تشکیل رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی (چینه‌سان):** مرحله تشکیل رخساره لایه‌ای نواری سولفیدی هم‌زمان با تشکیل رخساره کانسنگ توده‌ای بوده، به این صورت که سیال کانه‌دار در درون لایه‌بندی رسوبات نرم بالایی مانند چرت و شیل‌های میزبان بالایی نفوذ کرده و ضمن دگرسانی سریستی سنگ توفی میزبان کانسنگ نواری در آن تشکیل داده است. در این رخساره سولفیدها به‌صورت لایه‌ای-نواری و دانه پراکنده بوده و شامل اسفالریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت به همراه مقداری باریت است.

فاز سوم

آخرین فاز سیال کانه‌دار که به درون کانسنگ‌های فازهای قبلی نفوذ کرده، دارای میزان فراوان باریت به‌صورت دانه‌درشت بوده که در درون کانسنگ توده‌ای به‌صورت رگه-رگچه‌ای نفوذ کرده و در زمینه خود نیز حاوی کانی‌های سولفیدی شامل اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت و مارکاسیت است.

مرحله هوازدهی و سوپرژن

مرحله سوپرژن و هوازدهی شامل تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی و بالاآمدگی و رخداد فرایند سوپرژن است. مرحله بالاآمدگی با

شیوه‌های گوناگونی رده‌بندی شده‌اند. به عنوان مثال، از دیدگاه ترکیب فلزی، دسته‌های گوناگون ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد عبارتند از: غنی از مس (Zn-Cu و Co-Cu)، غنی از روی (Cu-Zn)، چند فلزی^۱ (Pb-Cu-Zn) و همچنین ذخایر غنی از طلا (Herrington et al., 2005; Seravkin, 2013). این کانسارها بر اساس نوع سنگ میزبان و چینه نگاری توالی میزبان نهشته‌ها، توسط باری و هانینگتون و فرانکلین و همکاران (Barrie and Hannington, 1999; Franklin et al., 2005) به پنج دسته اصلی لیتوتکتونیک زیر تقسیم‌بندی شده‌اند: (۱) مافیک^۲، (۲) بایمودال مافیک^۳، (۳) مافیک سیلیسی کلاستیک یا پلیتی مافیک^۴، (۴) فلسیک سیلیسی کلاستیک یا سیلیسی کلاستیک فلسیک یا بایمودال سیلیسی کلاستیک^۵ و (۵) بایمودال فلسیک^۶.

کانسارهای منطقه ونکان با توجه به ویژگی‌هایی از جمله نوع سنگ میزبان، نوع محیط زمین‌ساختی، نسبت سنگ‌های آتشفشانی به سنگ‌های رسوبی، همیافت کانی‌ها و دگرسانی با کانسارهای VMS نوع بایمودال فلسیک قابل مقایسه است (جدول ۱). از جمله این نوع کانسارها می‌توان کانسارهای کمر بند توف سبز ژاپن به سن میوسن (Ohmoto and Skinner, 1983)، برخی کانسارهای کمر بند آتشفشانی Mount Read تاسمانیای استرالیا مانند Rosebery (Large, 2001; Large et al., 1992)، کانسارهای کمر بند Skellefte (Montelius, 2005)، سوئد به سن پالئو پروتروژوئیک (Schlatter, 2005)، منطقه اوکیناوا ژاپن (Yeats et al., 2017) و همچنین کانسارهای کمر بند پونتیدنز ترکیه (Revan et al., 2014) را نام برد. کمر بند پونتیدنز همان ادامه کمر بند ماگمایی البرز بوده که دارای کانه‌زایی‌های متعدد نوع کوروکو است. ذخایر عمده کوروکو در شمال شرق Honsho ژاپن، یک نوع کلیدی از ذخایر اصلی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد برای مطالعه بیشتر کانسارهای نوع کوروکو در سراسر جهان هستند

فرایند گسل خوردگی و چین خوردگی باعث نفوذ آب‌های جوی، هوازدگی و شست‌وشوی مواد معدنی و ته‌نشست کانی‌های ثانویه در شکستگی‌ها شده و پهنه اکسیدان و سوپرژن گسترش یافته است. در مرحله سوپرژن در کانسار ونکان، برخورد آب‌های جوی با کانی‌های سولفیدی موجب ایجاد سولفیدهای ثانویه سوپرژن سولفیدی شده و در نزدیک سطح موجب ایجاد اکسید-هیدروکسیدهای آهن شده است. کانی‌های تشکیل شده در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی شامل کولیت، کالکوسیت دیژنیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، اسمیت زونیت، سروزیت، هماتیت، لیمونیت و گوتیت است. مراحل مختلف تشکیل کانسار و رخساره‌های مختلف آن به همراه بافت، ساخت، کانی‌های تشکیل دهنده معدنی و باطله و دگرسانی‌های موجود در مراحل مختلف به طور خلاصه در شکل ۱۲ ارائه شده است.

نوع کانه‌زایی

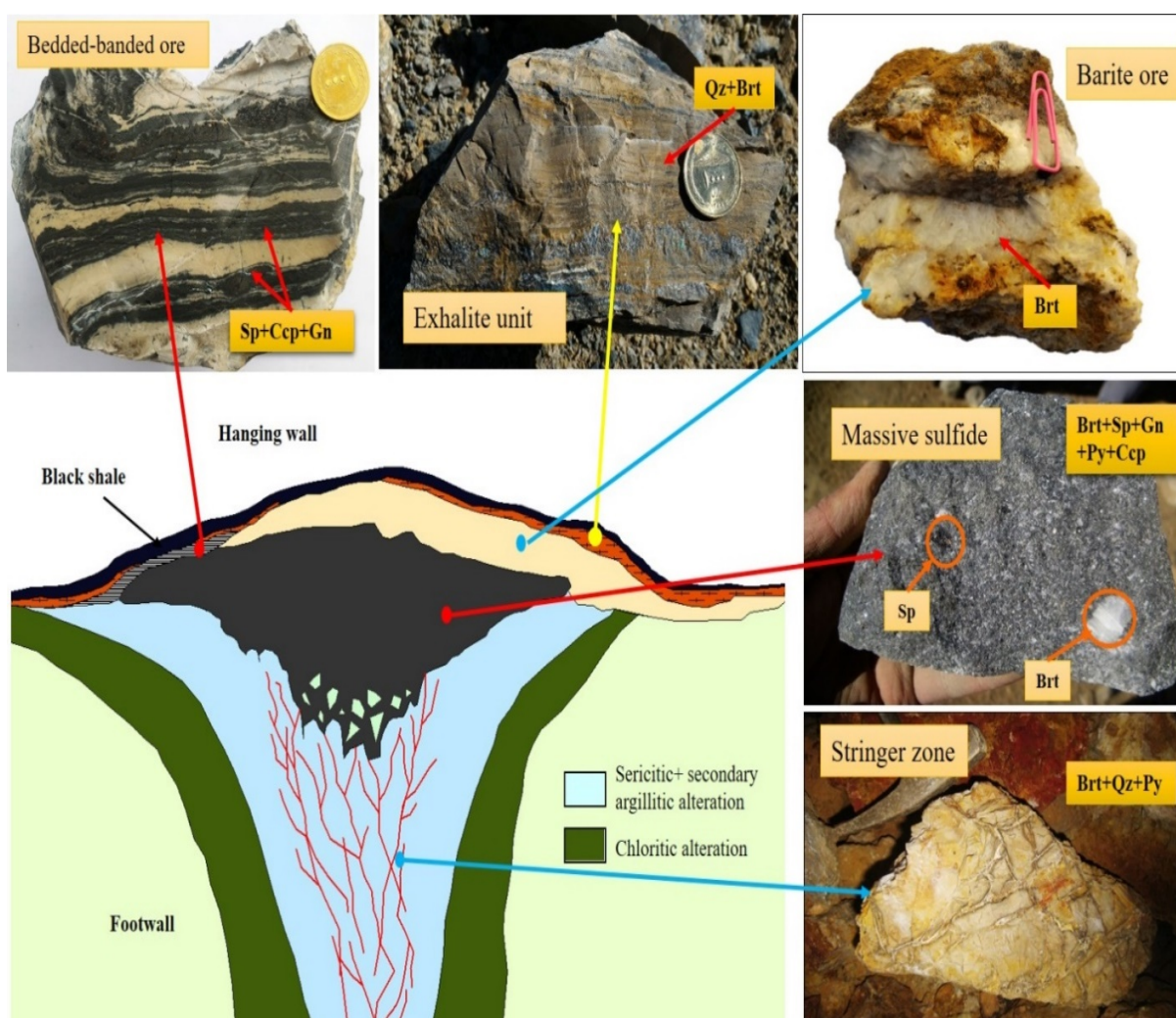
ذخایر سولفید توده‌ای میزبان آتشفشانی منابع مهمی از فلزات - پایه در حوضه‌های پشت قوسی و کمان‌های آتشفشانی در سراسر جهان هستند (Barrie et al., 1993; Galley et al., 1993; Herrington et al., 2005; van Staal and Goodfellow, 2007; Hollis et al., 2015; Yeats et al., 2017). کانی‌سازی در ذخایر سولفید توده‌ای تجمعی از سولفیدهای فلزی هستند که در زیر یا کف دریا نهشته شده‌اند (Franklin et al., 2005). تشکیل رخساره‌های کانه‌دار بر اساس گودفلو (Goodfellow, 2004) ارتباط نزدیکی با محل خروج سیالات کانه‌ساز دارد و در کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد معمول هستند (Franklin et al., 2005; Lobanov and Gaskov, 2012). بر این اساس در شکل ۱۵ موقعیت نمونه‌های سنگی رخساره‌های مختلف کانسار ونکان به صورت یک سامانه سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد نشان داده شده است. به طور کلی، کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد به

1. Poly metallic
2. Cyprus-type
3. Noranda-type

4. Besshi-type
5. Bathurst-type
6. Kuroko-type

1995). ماده معدنی اصلی نیز در منطقه ونکان اغلب شامل باریت، اسفالریت و گالن و به مقادیر کمتر پیریت و کالکوپیریت است. ذخایر نوع کوروکو به ترتیب از پایین به بالا از ژپس، سیلیس، کانسنگ زرد، کانسنگ سیاه، کانسنگ باریتی و سنگ چرت آهن‌دار تشکیل شده‌اند (Shikazono et al., 2008).

(Glasby et al., 2008). سنگ درون‌گیر ماده معدنی در نوع کوروکو، اغلب متاولکانیک فلسیک (شامل ریولیت و داسیت) است که در کانسار ونکان سنگ‌های فلسیک نیز توف‌های فلسیک ریولیتی و داسیتی در کنار سنگ‌های آندزیتی به صورت سنگ‌های میزبان و همراه هستند. نوع ماده معدنی در کانسارهای کوروکو اغلب اسفالریت و گالن (روی و سرب) بوده که مرتبط با سنگ‌های میزبان کانه‌زایی آنها (فلسیک) است (Taylor et



شکل ۱۵. موقعیت نمونه‌های سنگی رخساره‌های مختلف کانسار ونکان در سامانه سولفید توده‌ای آتشفشان زاد. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Qz: کوارتز، Brt: باریت، Py: پیریت).

Fig. 15. Position of various ore facies samples of the Vanakan deposit within a volcanogenic massive sulfide system. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: sphalerite, Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Qz: quartz, Brt: barite, Py: pyrite).

جدول ۱. مقایسه کانسار ونکان با کانسارهای سولفید توده‌ای نوع کوروکو شامل کانسارهای کوروکو در ژاپن، کانسار رزبری در تاسمانیای استرالیا، کانسار ورنندان کاشان، کانسار پشته سمنان و کانسار باریکا سردشت در ایران

Table 1. Comparison of Vanakan deposit with the massive sulfide Kuroko-type deposits in Japan, Rosebery deposit in Tasmania, Australia, Varandan deposit and Barrika deposit in Sardasht, Iran

Features Index	Vanakan deposit	Iran, Semnan, Poshteh deposit	Iran, Sardasht Barika deposit	Australia, Tasmania, Rosebery deposit	Japan, Kuroko deposit
Tectonic setting	Continental arc	Continental arc	Continental arc	Back- arc or Intra- arc	Back- arc
Host rocks	tuff, shale, shaly tuff and andesite lava	tuff, andesite lava and dacite	rhyolitic tuff, andesite	rhyolite, dacite	rhyolite, dacite
Mineralization age	Eocene	Eocene	Early Cretaceous	Cambrian	Miocene
Structure and texture	Veins-veinlets, massive, banded	massive, banded, disseminated, veinsveinlets.	massive, banded, disseminated, veinsveinlets	massive, banded, disseminated, veinsveinlets	massive, banded, disseminated, veins-veinlets
Ore mineral	Barite, sphalerite, galena, pyrite, chalcopryrite	Barite, pyrite, chalcopryrite, sphalerite, galena, Pyrolusite, Psilomelane	pyrite, sphalerite, galena, stibnite, sulfosalt, electrum, chalcopryrite	pyrite, galena, sphalerite, chalcopryrite, arsenopyrite, tetrahedrite, bourmonite, boulangerite, jvrdanite, electrum	sphalerite, galena, pyrite, chalcopryrite, tetrahedrite
Gangue mineral	Quartz, chlorite, sericite	Kaolinite, sericite	abundant barite, quartz	quartz, sericite, chlorite, carbonate, barite (many times)	abundant barite, quartz
Metal Zoning	Ba- Zn- Pb- Cu	Ba- Pb- Zn- Cu	Au-Ag- Zn- -Pb-Cu-	Cu-(Au) -» Zn-Pb-Au -» Ba-Au	Cu » Zn-Pb» Ba
Alteration	Sericite, silicic, chlorite	chlorite, sericite, argillitic, epidote	sericite, silicic, pyrite, chlorite and calcite	sericite, pyrite, silicic, chlorite, calcite, albite	sericite, pyrite, silicic, chlorite
References	This study	Ghaffari, 2017	Tajeddin et al., 2010	Large, 1992; Large et al., 2001	Ohmoto and Skinner, 1983; Huston et al., 2011

انواع مواد معدنی در کانسارهای نوع کوروکو شامل کانسنگ باریت (باریت بیشتر از سولفید)، کانسنگ سیاه غنی از روی-سرب (اسفالریت تقریباً برابر با باریت ولی بیشتر از پیریت و گالن) و کانسنگ زرد غنی از مس (کالکوپیریت برابر با پیریت ولی بیشتر از اسفالریت) است (Ohmoto, 1996) که در کانسار ونکان نیز از پایین به بالا بخش رگه-رگچه ای باریت-سیلیس، کانسنگ سولفید توده‌ای سیاه، کانسنگ سولفیدی لایه‌ای-نواری، کانسنگ باریتی و رسوبات نواری-برون‌دمی غنی از چرت آهن‌دار تشکیل شده است. در این کانسار کانسنگ سولفید توده‌ای بعد از کانسنگ باریتی و رسوبات نواری-برون‌دمی چرت‌دار تشکیل شده است. با توجه به بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی و مرز جانشینی و تزریقی بین کانسنگ باریتی در بالا و کانسنگ سولفید توده‌ای در زیر، چنین استنباط می‌شود که کانسنگ سولفید توده‌ای در اثر نفوذ سیالات فاز دوم کانه‌زایی ایجاد شده که در زیر کانسنگ باریت لایه‌ای فاز اول نفوذ کرده‌اند. در کانسارهای نوع کوروکو تشکیل کانسنگ باریتی در مرحله اول معمول است؛ به‌طوری‌که در مرحله اول استرینگر، کانسنگ باریتی و واحد چرتی آهن‌دار بالایی یا اگزالیت تشکیل می‌شود و سپس با نفوذ سیالات داغ‌تر بعدی به ترتیب کانسنگ سولفید توده‌ای سیاه (غنی از اسفالریت و گالن) و سپس کانسنگ سولفید توده‌ای زرد (غنی از کالکوپیریت) تشکیل می‌شود (Ohmoto and Skinner, 1983). البته کانسنگ زرد در کانسار ونکان دیده نمی‌شود. مواد معدنی اصلی شناسایی شده در کانسنگ سیاه در کانسارهای نوع کوروکو عبارتند از اسفالریت، باریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت با مقادیری تتراهدريت است (Ohmoto, 1996; Halbach et al., 2003; Glasby et al., 2008) که در کانسار ونکان نیز این کانی‌ها به‌صورت عمده دیده می‌شوند. پدیده مریضی کالکوپیریت که در اسفالریت در کانسار ونکان دیده می‌شود، ابتدا توسط بارتون (Barton Jr, 1987) در نمونه‌های رسوبات کوروکو شناسایی و به‌عنوان بیماری کالکوپیریت نام‌گذاری شد. بیماری کالکوپیریت نشان‌دهنده

کانی‌سازی مس بعد از کانی‌سازی روی است که نشان‌دهنده تبدیل رخساره رگه-رگچه‌ای به رخساره کانسنگ توده‌ای است و پدیده بسیار رایج در کانسارهای سولفید توده‌ای و همچنین در انواع دیگر از ذخایر سولفیدی است (Ohmoto, 1996). به‌طور کلی ذخایر VMS مرتبط با سنگ‌های آتشفشانی به‌صورت چینه‌سان و هم‌روند با توالی سنگ میزبان هستند (Franklin et al., 2005; Hannington et al., 2005; Herrington et al., 2005). در کانسار ونکان نیز بر اساس مشاهدات، ماده معدنی به‌صورت پیکره‌های عدسی شکل، لایه‌ای-نواری و به‌صورت همخوان و هم‌روند با لایه‌بندی سنگ‌های درون‌گیر رخ داده است. این پیکره‌ها دارای ضخامت متغیر از ۰/۵ تا ۵ متر و طول تا ۱۰۰ متر هستند. در نوع کوروکو مقدار زیادی کانی‌های سولفاتی باریت و ژیپس دیده می‌شود (Singer, 1986) که در منطقه ونکان نیز همین‌طور است و باریت به مقدار فراوان دیده می‌شود. به‌طور کلی، کانسار ونکان بیشترین شباهت را با نوع کوروکو نشان می‌دهد که به‌صورت شکل شماتیک ترسیم شده و تصویر نمونه دستی رخساره‌های مختلف کانسار ونکان در آن نمایش داده شده است (شکل ۱۵). در ادامه کانسار ونکان با کانسارهای مشابه در ایران مانند پشته، ورن‌دان و باریکای سردشت و همچنین کانسارهای حوضه هوکوروکو ژاپن و کانسارهای رزبری در استرالیا مورد مقایسه قرار گرفته است که از لحاظ سنگ‌های میزبان و همراه، سن کانه‌زایی، شکل هندسی پیکره‌های معدنی، ساخت و بافت، کانی‌های معدنی، کانی‌های باطله، پهنه‌بندی فلزی و دگرسانی، شباهت‌های زیادی با نوع کوروکو دارد که در جدول ۱ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

بر اساس شواهد موجود حاصل از بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در کانسار باریت-فلزات پایه ونکان از جمله شکل هندسی لایه‌ای و عدسی شکل پیکره‌های معدنی به‌صورت هم‌روند و همخوان با لایه‌بندی سنگ‌های توالی آتشفشانی-

باریت-فلزات پایه ونکان در زمان ائوسن در اثر فعالیت‌های همرفتی گرمایی زیردریایی در داخل یک حوضه کششی در حال فرونشست رسوبی که همراه با خروج مواد آتشفشانی بوده است، به صورت کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد رخ داده است. کانسارهای باریت-فلزات پایه ونکان بر اساس مقایسه آن با انواع مختلف سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، بیشترین شباهت را با کانسارهای نوع کوروکو نشان می‌دهند.

رسوبی میزبان، وجود رخساره‌های متعدد کانه‌زایی شامل رخساره رگه-رگچه‌ای، رخساره سولفید توده‌ای، رخساره لایه‌ای-نواری سولفیدی، رخساره کانسنگ باریتی و رخساره رسوبات نواری-برون‌دمی، وجود کانی‌های سولفیدی اسفالریت، گالن، باریت، پیریت و کالکوپریت در مواد معدنی و همچنین وجود دگرسانی‌های عمده کلریتی و سریسیتی که پهنه‌بندی واضح و مشخصی دارند، چنین به نظر می‌رسد که کانه‌زایی

References

- Aghanabati, S.A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 400 pp. (in Persian)
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983-992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2)
- Alavi-Naini, M., 1997. Geological map of Jam, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley & Sons, New York: 797 pp.
- Barrie, C.T. and Hannington, M.D., 1999. Introduction: classification of VMS deposits based on host rock composition. In: C.T. Barrie and M.D. Hannington (Editors), Volcanic-associated massive sulfide deposits: processes and examples in modern and ancient settings. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 2-10. <https://doi.org/10.5382/Rev.08.01>
- Barrie, C.T., Ludden, J.N. and Green, T.H., 1993. Geochemistry of volcanic rocks associated with Cu-Zn and Ni-Cu deposits in the Abitibi subprovince. Economic Geology, 88(6): 1341-1358. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.6.1341>
- Barton Jr, P.B., 1978. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan. Mining Geology, 28(150): 293-300. <https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu1951.2>
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Galley, A.G. and Jonasson, I.R., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. In: J.W., Hedenquist, J.F.H., Thompson, R.J., Goldfarb and J.P., Richards (Editors), Economic Geology 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 523-560. <https://doi.org/10.5382/AV100.17>
- Galley, A.G., Bailes, A.H. and Kitzler, G., 1993. Geological setting and hydrothermal evolution of the Chisel Lake and North Chisel Zn-Pb-Cu-Ag-Au massive sulfide deposits, Snow Lake, Manitoba. Exploration and Mining Geology, 2(4): 271-295. Retrieved June 13, 2021 from <https://pubs.geoscienceworld.org/cim/emg/article/2/4/271/61028/Geological-setting-and-hydrothermal-evolution-of>
- Ghaffari, G., 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Poshteh barite-kaoline-copper deposit, east of Semnan. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 186 pp. (in Persian with English abstract)
- Ghasemi, H. and Rezaei-Kahkhaei, M., 2015. Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. Mineralogy and Petrology, 109(2): 235-252. <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0353-3>
- Ghiasvand, A., Ghaderi, M. and Rashidnejad, N., 2009. Mineralogy, geochemistry and origin of iron deposits in north of Semnan. Geosciences, 18(72): 33-44.

- <https://doi.org/10.22071/GSJ.2010.57133>
- Gibson, H.L., Allen, R.L., Riverin, G. and Lane, T.E., 2007. The VMS model: Advances and application to exploration targeting. In B. Milkereit (Editor), *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. University Avenue Toronto, Ontario, pp. 713–730. Retrieved June 13, 2021 from <http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/49.pdf>
- Glasby, G.P., Iizasa, K., Hannington, M., Kubota, H. and Notsu, K., 2008. Mineralogy and composition of Kuroko deposits from northeastern Honshu and their possible modern analogues from the Izu-Ogasawara (Bonin) Arc south of Japan: Implications for mode of formation. *Ore Geology Reviews*, 34(4): 547–560.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.09.005>
- Goodfellow, W.D., 2004. Geology, genesis and exploration of SEDEX deposits, with emphasis on the Selwyn basin, Canada. In: M. Deb and W.D. Goodfellow (Editors), *Sediment-hosted lead-zinc sulfide deposits: Attributes and models of some major deposits of India, Australia and Canada*. Narosa publishing house, Delhi, India, pp. 24-99.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.3.597>
- Grenne, T. and Slack, J.F., 2005. Geochemistry of jasper beds from the Ordovician Løkken ophiolite, Norway: origin of proximal and distal siliceous exhalites. *Economic Geology*, 100(8): 1511–1527.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.8.1511>
- Haji-Bahrami, M., 2012. Petrography, geochemistry and genesis of the Hamyard iron deposit, northeast of Semnan. M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 175 pp. (in Persian with English abstract).
- Halbach, P.E., Fouquet, Y. and Herzig, P., 2003. Mineralization and compositional patterns in deep-sea hydrothermal systems. In: P.E., Halbach, V., Tunncliffe, J.R., Hein (Editors), *Energy and Mass Transfer in Marine Hydrothermal Systems*. Dahlem University Press, Berlin, pp. 85–122. Retrieved June 13, 2021 from <https://d-nb.info/966617797/04>
- Hannington, M.D., de Ronde, C.E.J. and Peterson, S., 2005. Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. In: J.W., Hedenquist, J.F.H., Thompson, R.J., Goldfarb and J.P., Richards (Editors), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, pp. 111–141.
<https://doi.org/10.5382/AV100.06>
- Hashemi, F., Mousivand, F. and Rezaei-Kahkhaei, M., 2015. Ore horizons, ore facies, mineralogy and geochemistry of volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits of the Varandan Ba-Pb-Cu deposit, southwest of Qamsar Iran. *Journal of Economic Geology*, 9(2): 587-616. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.45447>
- Herrington, R., Maslennikov, V., Zaykov, V., Seravkin, I., Kosarev, A., Buschmann, B., Orgeval, J.J., Holland, N., Tesalina, S. and Nimis, P., 2005. Classification of VMS deposits: lessons from the South Uralides. *Ore Geology Reviews*, 27(1-4): 203–237.
<http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.014>
- Hollis, S.P., Yeats, C.J., Wyche, S., Barnes, S.J., Ivanic, T.J., Belford, S.M., Davidson, G.J., Roache, A.J. and Wingate, M.T.D., 2015. A review of volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) mineralization in the Archaean Yilgarn Craton, Western Australia: Tectonic, stratigraphic and geochemical associations. *Precambrian Research*, 260: 113–135.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.002>
- Huston, D.L., Relvas, J.M.R.S., Gemmell, J.B. and Driberg, S., 2011. The role of granites in volcanic-hosted massive sulphide ore-forming systems: an assessment of magmatic–hydrothermal contributions. *Mineralium Deposita*, 46(5–6), 473–507.
<https://doi.org/10.1007/s00126-010-0322-7>
- Khanehdar-Kolver, M., 2017. Mineral chemistry of intrusive rocks and application of remote sensing for identification of the Gardaneh Ahovan rocks, NE Semnan. M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 195 pp. (in Persian with English abstract).
- Large, R.R., 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; features, styles, and genetic models. *Economic Geology*, 87(3): 471–510.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.3.471>
- Large, R.R., McPhie, J., Gemmell, J.B., Herrmann, W. and Davidson, G.J., 2001. The

- spectrum of ore deposit types, volcanic environments, alteration halos, and related exploration vectors in submarine volcanic successions: Some examples from Australia. *Economic Geology*, 96(5): 913–938. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.5.913>
- Lobanov, K. and Gaskov, I., 2012. The Karchiga copper massive sulfide deposit in the high grade metamorphosed rocks of the Kurchum block: geologic structure, formation, and metamorphism (Rudny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 53(1):77-91. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.006>
- Montelius, C., 2005. The genetic relationship between rhyolitic volcanism and Zn-Cu-Au deposits in the Maurliden Volcanic Centre, Skellefte District, Sweden: volcanic facies, lithogeochemistry and geochronology. Ph.D. thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden. 135 pp.
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K. and Watanabe, M., 2007. The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: first recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 183(3): 297–315. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0075>
- Ohmoto, H., 1996. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: the Kuroko perspective. *Ore Geology Reviews*, 10(3–6): 135–177. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(95\)00021-6](https://doi.org/10.1016/0169-1368(95)00021-6)
- Ohmoto, H. and Skinner, B.L., 1983. The Kuroko and related volcanogenic massive sulphide deposits: Introduction and summary of new findings. In: H. Ohmoto and B.J. Skinner (Editors), *Kuroko and related volcanogenic massive sulphide deposits*. *Economic Geology*, Canada, pp. 1–8. <https://doi.org/10.5382/Mono.05.01>
- Pezeshki, F., 2019. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Vanakan Barite-Kaoline deposit, east of Semnan. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 200 pp. (in Persian with English abstract)
- Revan, M.K., Genç, Y., Maslennikov, V.V., Maslennikov, S.P., Large, R.R. and Danyushevsky, L.V., 2014. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews* 63: 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>
- Robert, R., Seal, I.I. and Jane, M., 2008. Environmental geochemistry of a Kuroko-type massive sulfide deposit at the abandoned Valzinco mine, Virginia, USA. *Applied Geochemistry*, 23(2): 320–342. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.10.001>
- Samadi, M. and Moin-vaziri, H., 1998. Petrography, petrogenesis and geochemistry of igneous rocks at north to northeast of Semnan. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moaalem University, Tehran. Iran, 128 pp.
- Schlatter, D., 2005. Volcanic stratigraphy, chemical stratigraphy, and hydrothermal alteration of the Petiknäs South Volcanic-hosted massive sulfide deposit, Sweden. Licentiate thesis (including maps), Lulea University of Technology, Lulea, Sweden. 128 pp.
- Seravkin, I.B., 2013. Correlation between compositions of ore and host rocks in volcanogenic massive sulfide deposits of the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*, 55(3): 207–224. <https://doi.org/10.1134/S1075701513030057>
- Shahri, M., 2011. Investigation of skarnization, metasomatism and related to mineralization in Zartul area (Northeast Semnan). M.Sc. thesis, University of Technology, Shahrood, Iran, 144 pp. (in Persian with English abstract)
- Shikazono, N., Ogawa, Y. and Utada, M., 2008. Geochemical behavior of rare earth elements in hydrothermally altered rocks of the Kuroko mining area, Japan. *Journal of Geochemical Exploration*, 98(3): 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.12.003>
- Singer, D.A., 1986. Descriptive model of kuroko massive sulfide. In: D.P. Cox and D.A. Singer (Editors), *Mineral deposit models*. The United States Geological Survey Bulletin, America, pp. 189–190. Retrieved June 13, 2021 from <https://pubs.usgs.gov/bul/b1693/html/bull0bfp.htm>
- Tajeddin, H., Rastad, E., Yaqoubpour, A. and Mohajel, M., 2010. Stages of formation and development of sulfide deposit rich in Barika

- gold, eastern Sardasht, northwest of Sanandaj-Sirjan metamorphic zone: Based on fabrication, structures and texture of fluid inclusion. *Journal of Economic Geology*, 1(2): 97–121. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V2I1.3688>
- Taylor, C.D., Zierenberg, R.A., Goldforb, R.J., Kilburn, J.E., Seal, R.R. and Kleinkopf, M.D., 1995. Volcanic-associated massive sulfide deposits. United States Geological Survey, America, Open-File Report 95–831, 8 pp. Retrieved June 13, 2021 from <https://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/CHAP16.pdf>
- Van Staal, C.R. and Goodfellow, W.D., 2007. Pre-Carboniferous tectonic evolution and metallogeny of the Canadian Appalachians. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 5: 793–818. Retrieved June 13, 2021 from <https://www.researchgate.net/publication/285023302>
- 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>
- Yeats, C.J., Hollis, S.P., Halfpenny, A., Corona, J., Laflamme, C., Southam, G., Fiorentini, M., Herrington, R.J. and Spratt, J., 2017. Actively forming Kuroko-type volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) mineralization at Iheya North, Okinawa Trough, Japan. *Ore Geology Reviews* 84: 20–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.014>

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

Pezeshki Gharache, F., Mousivand, F., Rezaei-Kahkhaei, M. and Fardoust, F., 2021. Ore facies, mineralogy, alteration, geochemistry and genesis of the Vanakan (Sokan) barite-zinc-lead-copper deposit, north east of Semnan. *Journal of Economic Geology*, 13(1): 29–55. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i1.82657>



Ore facies, mineralogy, alteration, geochemistry and genesis of the Vanakan (Sokan) barite-zinc-lead-copper deposit, north east of Semnan

Farzaneh Pezeshki Gharache, Fardin Mousivand*, Mehdi Rezaei-Kahkhaei and Farajollah Fardoost

Department Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Submitted: Aug. 26, 2019

Accepted: July 29, 2020

Keywords: Barite- Zinc- lead- copper, volcanogenic massive sulfide, Kuroko, Vanakan, Sokan, ore facies, Semnan

Introduction

The Vanakan (Sokan) barite-zinc-lead-copper deposit is located at 23 km northeast of Semnan, in the North Central Iran magmatic belt. It has occurred within the Eocene volcanic-sedimentary sequence. The host rocks of the ores mainly consist of tuff, shale and shaly tuff. Volcanic rocks in the district at the Ahovan region involve both mafic and felsic compositions including basalt, andesite, dacite, rhyolite and tuff. Many studies have been conducted on ore deposits in the Semnan region including Poshteh barite- base metals volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit (Ghaffari, 2017), Hamyard (Haji-Bahrami, 2012) and northeast Semnan (e.g., Ghiasvand et al., 2009; Shahri, 2011) iron skarn deposits. Therefore, studying the barite-metal deposits in the Central Iran magmatic belt such as the Vanakan deposit, can provide exploratory keys to discover new reserves, which is one of the main goals of this research study. In this work, study on ore facies, mineralogy, alteration, geochemistry and genesis of the Vanakan barite-zinc-lead-copper deposit are considered.

Materials and methods

First, regional and local geology, alteration, ore textures and structures and mineralogy of ore horizons in the Vanakan ore deposit were carefully checked out and studied during field studies. Then, the samples were systematically collected from

trenches and open pit of the mine. Mineralogical studies were conducted on 24 thin sections and 8 polished samples in the microscopic laboratory at the Shahrood University of Technology. For geochemical studies, about 16 systematic samples from different ore facies and ore horizons were collected. Then, the samples were analyzed by inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy (ICP-AES) method, and a few samples were studied by X-ray diffraction (XRD) method in the Aria Sharif Laboratories Company.

Results

The host sequence in the Vanakan deposit involves three units, from bottom to top: Unit1: conglomerate, limestone, sandstone; Unit2: andesitic to dacitic lava-rich, and unit3: acidic tuff-rich. Mineralization as the Vanakan 1 and 2 deposits occurred at top of unit 2 and within unit 3. The entire Vanakan area involves a local syncline with northeast-southwest axial trend, in which the Vanakan 1 and Vanakan 1 deposits are located in the northern and southern limbs of the syncline, respectively. Based on structural, textural and mineralogical studies, five different ore facies were distinguished in Vanakan 1, from bottom to: 1) vein-veinlet and breccia: involving barite-pyrite-quartz vein-veinlets, 2) massive sulfide: composed of massive sphalerite, galena, barite, chalcopyrite and pyrite, 3) layered-banded sulfide ore: involving alternations of ore and sericite altered tuff-rich

*Corresponding author Email: mousivand@shahroodut.ac.ir

bands, 4) baritic ore: comprising of mainly barite and little sulfides, and 5) banded-exhalative cherty sediments. The ore facies in the Vanakan 2 from bottom to top are 1) barite -(galena)-rich vein-veinlets and 2) banded cherty iron oxide-hydroxides -rich red exhalative sediment. From a mineralogical point of view, the ores in the Vanakn 1 mainly consist of barite, sphalerite, galena, pyrite, chalcopyrite and marcasite accompanied with secondary minerals such as malachite, chrysocolla, smithsonite, cerussite, hematite, limonite, goethite.

Discussion

Based on different characteristics of mineralization in the Vanakan district, such as geometry of ore bodies, textures and structures, ore facies, wall rock alterations, mineralogy, metal zonation and geochemical features, the Vanakan deposit can be classified as a bimodal- felsic or Kuroko-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, similar to those of the Mount Read volcanic deposits of Tasmania Australia such as Rosebery (Large, 1992; Large et al., 2001) and Hokuroko basin in Japan (Huston et al., 2011; Ohmoto and Skinner, 1983).

References

- Ghaffari, G., 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Poshteh barite-kaoline-copper deposit, east of Semnan. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 186 pp. (in Persian with English abstract)
- Ghiasvand, A., Ghaderi, M. and Rashidnejad, N., 2009. Mineralogy, geochemistry and origin of iron deposits in north of Semnan. *Geosciences*, 18(72): 33–44. <https://doi.org/10.22071/GSJ.2010.57133>
- Haji-Bahrami, M., 2012. Petrography, geochemistry and genesis of the Hamyard iron deposit, northeast of Semnan. M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 175 pp. (in Persian with English abstract).
- Huston, D.L., Relvas, J.M.R.S., Gemmell, J.B. and Driberg, S., 2011. The role of granites in volcanic-hosted massive sulphide ore-forming systems: an assessment of magmatic–hydrothermal contributions. *Mineralium Deposita*, 46(5–6), 473–507. <https://doi.org/10.1007/s00126-010-0322-7>
- Large, R.R., 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; features, styles, and genetic models. *Economic Geology*, 87(3): 471–510. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.3.471>
- Large, R.R., McPhie, J., Gemmell, J.B., Herrmann, W. and Davidson, G.J., 2001. The spectrum of ore deposit types, volcanic environments, alteration halos, and related exploration vectors in submarine volcanic successions: Some examples from Australia. *Economic Geology*, 96(5): 913–938. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.5.913>
- Ohmoto, H. and Skinner, B.L., 1983. The Kuroko and related volcanogenic massive sulphide deposits: Introduction and summary of new findings. In: H. Ohmoto and B.J. Skinner (Editors), *Kuroko and related volcanogenic massive sulphide deposits*. *Economic Geology*, Canada, pp. 1–8. <https://doi.org/10.5382/Mono.05.01>
- Shahri, M., 2011. Investigation of skarnization, metasomatism and related to mineralization in Zartul area (Northeast Semnan). M.Sc. thesis, University of Technology, Shahrood, Iran, 144 pp. (in Persian with English abstract)