

دانشگاه صنعتی شاهرود

دوره ۱۲، شماره ۱، سال ۱۴۰۵، صفحات ۵۰ - ۳۹

(DOI): 10.22044/JRAG.2025.16928.1374 شناسه دیجیتال

مطالعات زمین‌شناسی و ژئوالکتریکی (IP, RS) کانسار مس واجارو، جنوب غرب شاهرود

سید اسحاق طباطبایی^۱؛ سوسن ابراهیمی^{۲*} و علیرضا عرب امیری^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن_اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: ebrahimisusan@gmail.com

چکیده

کانی‌سازی مس واجارو در ۲۰ کیلومتری غرب روستای تروود و در جنوب غرب شهرستان شاهرود واقع شده است و از لحاظ زمین‌شناسی در زون متالوژنی تروود-چاه شیرین قرار دارد. کانی‌سازی سطحی مس سولفیدی-اکسیدی در سنگ میزبان آتشفشانی ائوسن واقع شده است. برای تعیین عمق و امتداد کانی‌سازی، مطالعات ژئوفیزیک به روش ژئوالکتریک (IP/RS) با روش قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی بر روی شش پروفیل انجام گرفت. نتایج این مطالعات ادامه کانی‌سازی را تا عمق ۵۰ متری نشان داده است که با حفاری‌های انجام شده کانی‌سازی تا عمق ۱۸۵ متری مشاهده گردید. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد، سنگ میزبان کانی‌سازی با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالت است که متحمل دگرسانی‌های وسیع پروپیلیتی و دگرسانی‌های محلی سریسیتی-کربناتی و هیدروکسید آهن (با گسترش محدود به کانی‌سازی) شده است. کانی‌سازی به صورت رگه و رگچه‌ای، پراکنده و پرکننده فضاهای خالی است. رگچه‌های کلسیتی با ضخامت کم همراه با ماده معدنی شکستگی‌ها را پر کرده و ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی نشان می‌دهد. کانی‌سازی در دو مرحله هیپوزن و سوپرژن تشکیل شده است؛ که در مرحله هیپوزن کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با کانی‌های اپیدوت، کلریت، سریسیت و رگچه‌های کلسیتی تشکیل شده است. در مرحله سوپرژن کانی‌های اکسیدی و سولفیدی شامل کالکوسیت ثانویه، کوولیت، مالاکیت، آزوریت و گوتیت در شکستگی‌ها و حفرات سنگ تشکیل شده است. مطالعات میان‌بارهای سیال بر روی کانی کلسیت دمای بین ۱۲۱ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ذوب یخ بین ۱/۱- تا ۵/۸- درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد؛ که میزان شوری‌های به دست آمده بین ۱/۸ تا ۸/۹ درصد وزنی معادل نمک طعام است. با توجه با ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، بافت و ساخت ماده معدنی و داده‌های میان‌بارهای سیال، کانی‌سازی مس واجارو قابل مقایسه با ذخایر تیب مانتو می‌باشد.

واژگان کلیدی

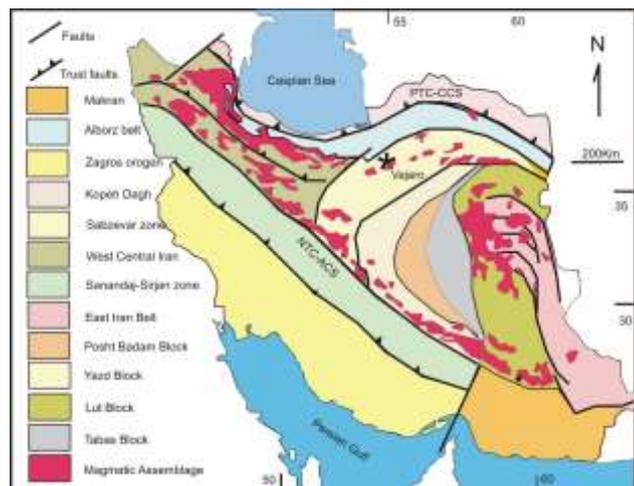
شاهرود
مانتو
مس
ژئوالکتریک
میان‌بارهای سیال
واجارو

۱- مقدمه

محدوده معدنی واجارو در ۲۰ کیلومتری غرب روستای ترو، ۱۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب شهرستان شاهرود و در استان سمنان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ ترو و در وره ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان قرار گرفته است و منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. کانی‌سازی مس به‌صورت رگه و رگچه، پراکنده و پراکنده فضای خالی در سنگ میزبان آتشفشانی و آذرآوری ائوسن قرار دارد. این محدوده از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری ایران در حاشیه شمالی کویر ایران مرکزی واقع شده (شکل ۱) و از نظر زمین‌شناسی در کمان ماگمایی ترو-چاه شیرین قرار دارد (Stöcklin, 1968; Alavi, 1991).

توالی‌های آتشفشانی دوران سوم در شمال‌شرق ایران، میزبان کانی‌سازی‌های چینه‌ای مس می‌باشد (نوع مانتو) که می‌تواند از نظر اقتصادی مورد توجه قرار گیرد. در سالهای اخیر اکتشافات مهمی در زون متالوژنی ترو-چاه شیرین انجام گرفته است که به اکتشاف کانسارهای مس پیرمردان (Ebrahimi, 2019)، چاه موسی (Emamjome et al., 2008) و نمکزار (Kamali, 2020) منجر شده است. این نوع کانسارهای مس در ناحیه متالوژنی عباس‌آباد نظیر معدن بزرگ، چغندرسر، دوچپله و آسمانو نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند (Salehi et al., 2017; Tavasoli and Lotfi, 2007; Ebrahimi et al., 2020; Ebrahimi et al., 2019).

بررسی‌های تفصیلی در منطقه معدنی واجارو شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰، مطالعات ژئوفیزیک به‌روش ژئوالکتریک (IP/RS) بر روی ۶ پروفیل به روش دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی، حفر بیش از ۶۰۰ متر مکعب ترانشه، حفر ۶ گمانه اکتشافی با عمق‌های ۴۷ تا ۱۸۵ متر (در مجموع ۷۶۰ متر) و آنالیز شیمیایی بیش از ۷۰ نمونه به روش ICP-OES جهت تعیین عیار ماده معدنی می‌باشد. کمترین عیار مس ۰/۱ درصد (نمونه مربوط به عمق و کانی‌سازی سولفیدی است) و بیشترین عیار آن ۴/۲ درصد می‌باشد (نمونه سطحی بوده و مربوط به کانی‌سازی اکسیدی است). هدف از انجام این پژوهش، تعیین عمق کانی‌سازی توسط مطالعات ژئوفیزیکی و خصوصیات کانی‌سازی مس بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و سیالات درگیر می‌باشد.



شکل ۱. نقشه ساده شده تکتونیک ایران با زون‌های زمین‌ساختی گوناگون و توزیع مجموعه‌های ماگمایی سنوزوئیک (after Alavi, 1991; Stöcklin, 1968) علامت ستاره موقعیت محدوده واجارو در شمال‌شرق ایران را نشان می‌دهد.

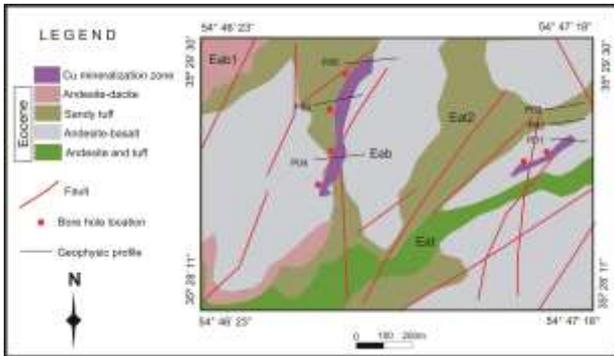
۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

رشته کوه ترو-چاه شیرین در ناحیه مرکزی و شرقی زون ساختاری البرز واقع شده است (Alavi, 1996). این ناحیه عمدتاً از سنگهای ماگمایی ترشیری تشکیل شده و با سنگهای دگرگونی و رسوبی پالئوزوئیک و مزوزوئیک همراه است. اوج فعالیت ماگمایی در این زون از اواسط تا اواخر ائوسن رخ داده است که از قدیم به جدید به سه مرحله تقسیم شده است (Hushmandzadeh, 1978). در مرحله اول فعالیت‌های آتشفشانی انفجاری با ترکیب ریولیت، توفهای ریوداستیتی و آندزیت همراه با مارن و ماسه‌سنگ اتفاق افتاده است؛ در مرحله دوم جریان‌های گدازه‌های آندزیتی، تراکی آندزیت و آندزیت بازالت ایجاد شده و در مرحله سوم با سنگهای نیمه عمیق داسیت و ریوداسیت ادامه یافته است. رشته کوه ترو-چاه شیرین میزبان ذخایر متنوعی از فلزات پایه و قیمتی اپی‌ترمال مانند گندی و پوسیده، سرب و روی مانند چشمه حافظ و مس نظیر چاه مسی و پیرمردان می‌باشد (Shamanian et al., 2004).

۳- مواد و روش

این پژوهش بر اساس مشاهدات صحرایی و نمونه‌برداری از رخنمون‌های سطحی و گمانه‌های حفاری انجام شده است. مطالعات ژئوفیزیکی بر روی ۶ پروفیل و با روند E-W و NE-SW طراحی و برداشت گردید. این عملیات برای برداشت مقاومت ویژه و IP از دستگاه گیرنده (GDD IP Receiver) و دستگاه فرستنده (GDD IP Transmitter) ساخت کشور کانادا استفاده شده است. برای شناخت سنگ میزبان، دگرسانی و کانی‌شناسی کانسنگ بیش از ۳۵ مقطع نازک و صیقلی تهیه و توسط میکروسکوپ نور انعکاسی و انکساری در دانشگاه صنعتی شاهرود مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ۷ نمونه کلسیت برای مطالعات ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال انتخاب شد که ۴ نمونه حاوی میان‌بارهای مناسب

فئوکریست را در متن سنگ تشکیل می‌دهد که با مقادیر کمتری هورنبلند همراهی می‌شود. پلاژیوکلاز با ابعادی تا ۲ میلی‌متر و فراوانی ۳۰ درصد در متن سنگ تشکیل شده است و هورنبلند با ابعاد کوچکتر از ۰/۳ میلی‌متر در متن سنگ تشکیل شده که در بیشتر موارد تجزیه و به کلریت تبدیل شده است.



شکل ۲. نقشه ساده شده زمین‌شناسی-معدنی محدوده کانی‌سازی واجارو که موقعیت گمانه‌های اکتشافی بر روی آن مشخص گردیده است.

۴-۲ دگرسانی سنگ میزبان

دگرسانی گرمابی در منطقه واجارو از گسترش وسیعی برخوردار است و اغلب نمونه‌های سنگ‌شناختی آثاری از دگرسانی را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان می‌دهد، دگرسانی در ابعاد محلی و ناحیه‌ای رخ داده است. مهمترین دگرسانی در منطقه دگرسانی پروپیلیتیک و سریسیتی-کربناتی است که به‌طور گسترده منطقه را تحت تاثیر قرار داده است. دگرسانی پروپیلیتیک که گسترش زیادی را نشان می‌دهد، حاوی کانی‌های کلریت و اپیدوت (جزیی‌تر) می‌باشد که از تجزیه هورنبلند حاصل شده است (شکل ۳-۲). همچنین کانی‌هایی نظیر سریسیت و کلسیت از تجزیه پلاژیوکلازها حاصل شده است، اکسیدهای آهن نیز در این دگرسانی مشاهده گردید. دگرسانی سریسیتی-کربناتی با گسترش کمتر اغلب سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار داده است. غالب کانی‌های فلدسپاری به سریسیت، کانی‌های رسی و کربنات تجزیه شده است که در مواردی رگچه‌های اکسید آهن نیز در سنگ‌ها مشاهده شده است (شکل ۳-۲). دگرسانی هیدروکسید آهن که در حد فاصل رخنمون‌های معدنی قرار دارد و گسترشی در حد چند متر را نشان می‌دهد، باعث تخریب شدید سنگ شده به‌طوری‌که بافت کلی سنگ از بین رفته و اغلب شکستگی‌ها و حفرات سنگ توسط هیدروکسیدهای آهن پر شده است همچنین رگچه‌های کربناتی نیز در این دگرسانی مشاهده گردید (شکل ۳-۲).

اندازه‌گیری تشخیص داده شد. بررسی مطالعات ریزداماسنجی با استفاده از صفحه گرم کننده و سرد کننده ساخت شرکت Linkam در آزمایشگاه میکروتوموگرافی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. درستی اندازه‌گیری‌ها برای دماهای گرمایش $\pm 2^\circ\text{C}$ و برای سرمایش $\pm 0/2^\circ\text{C}$ است.

۴-بحث و نتایج

۴-۱ زمین‌شناسی منطقه

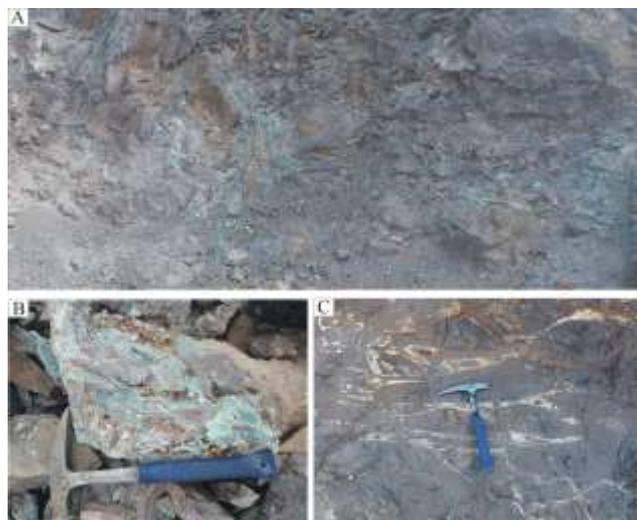
واحدهای سنگ‌شناختی در منطقه واجارو شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری است. قدیمی‌ترین واحد در منطقه از ترکیب آندزیت و توف تشکیل شده است (E^{at}). این واحد که در قسمت میانی نقشه گسترش نسبتاً کمی دارد متحمل دگرسانی پروپیلیتیک شده است و شواهد ضعیفی از کانی‌سازی را نشان می‌دهد، همچنین شکستگی‌های ظریف سنگ میزبان توسط کربنات پر شده است. این واحد توسط واحد آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت-بازالت با رنگ خاکستری تیره پوشانده شده که بخش وسیعی از نواحی میانی، شرقی و غربی منطقه را در بر می‌گیرد (E^{ab}). این واحد متحمل دگرسانی‌های پروپیلیتیک، سریسیتی و همچنین دگرسانی هیدروکسید آهن (مرتبط با کانی‌سازی) شده است. رخنمون‌های اصلی کانی‌سازی در این واحد تشکیل شده و شکستگی‌های موجود در سنگ توسط مواد معدنی و کربنات پر شده است. بر روی این واحد توف ماسه‌ای سبز رنگ قرار گرفته است که بخش‌های میانی منطقه را پوشانده است (E^{at2}). شواهد بسیار ضعیفی از کانی‌سازی در این واحد مشاهده شده و دگرسانی سریسیتی را نشان می‌دهد. جوان‌ترین واحد آتشفشانی در منطقه از آندزیت تا داسیت با رنگ خاکستری تشکیل شده که ناحیه غربی منطقه را شامل می‌شود و فاقد آثار کانی‌سازی است (E^{ab1}).

در این ناحیه دسته گسل‌هایی با راستای N60-70E مشاهده می‌شود که در راستای کلی شمال و شمال شرق می‌باشد. مهمترین و قدیمی‌ترین گسل در منطقه گسل ترود است که تاکنون چندین بار فعال شده است. شواهد صحرایی نشان می‌دهد، روند کانی‌سازی در منطقه تقریباً با روند گسل‌های موجود در منطقه همخوانی داشته و روندی شمالی-جنوبی و شمال‌شرق-جنوب‌غرب را نشان می‌دهد.

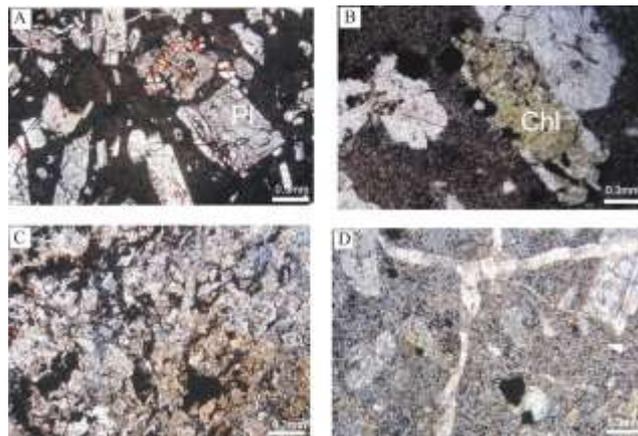
مطالعات صحرایی و مقاطع نازک نشان می‌دهد، سنگ میزبان کانی‌سازی اصلی مربوط به واحد آندزیتی (E^{ab}) است. این واحد با بافت پورفیریک و خمیره‌ای شیشه‌ای-میکروولیتی تشکیل شده است. میکروولیت‌ها عمدتاً شامل پلاژیوکلاز و مقادیر اندکی هورنبلند است، همچنین کانی‌های تیره در زمینه سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۳-۱). پلاژیوکلاز کانی اصلی

پلاژیوکلاز تشکیل شده است. بررسی‌های صحرایی و مطالعات میکروسکوپی مانند کانی‌شناسی و روابط بافتی نشان می‌دهد، کانی‌سازی در دو مرحله هیپوژن و سوپرژن تشکیل شده است.

در مرحله آغازین هیپوژن کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با کانی‌های اپیدوت، کلریت و سرپسیت و رگچه‌های کلسیتی و کوارتزی (بسیار کم و نازک) تشکیل شده است. مگنتیت با فراوانی کمتر از ۱ درصد به صورت دانه‌های نیمه وجه‌دار با ابعاد تا ۵۰ میکرون به صورت افشان و شکافه پرکن تشکیل شده است. کالکوپیریت با فراوانی بسیار کم (چند عدد) به صورت دانه‌های نیمه وجه‌دار با ابعاد کمتر از ۱۰۰ میکرون در فضاهای خالی حضور دارند. بورنیت با فراوانی کمتر از ۱ درصد به صورت دانه‌های درشت در حفرات و شکستگی‌های ریز مشاهده شد که در مواردی به کالکوسیت تجزیه شده است (شکل ۵-A). مس خالص به صورت دانه‌های بسیار ریز و ناچیز مشاهده شده است. کالکوسیت‌های اولیه فراوانترین کانی در این مرحله است که در حفرات و شکستگی‌های سنگ و کانی (پلاژیوکلاز و هورنبلند) تشکیل شده است که در مواردی به کولیت تجزیه شده است (شکل ۵-B, C). رگچه‌های کلسیتی در این مرحله تشکیل شده‌اند و گسترش زیادی را نشان می‌دهند و حاوی مواد معدنی نظیر کالکوسیت و بورنیت می‌باشند. در مرحله سوپرژن که به دو زیر مجموعه کانی‌های اکسیدی و سولفیدی تقسیم می‌شود؛ کانی‌های سولفیدی شامل کالکوسیت ثانویه و کولیت است که حاصل تجزیه کانی-های بورنیت و کالکوسیت‌های اولیه می‌باشند. کانی‌های اکسیدی شامل ملاکیت، آزوریت، کوپریت (بسیار کم) و گوتیت است که اغلب در شکستگی‌ها و حفرات سنگ مشاهده می‌شود و از اکسایش کانی‌های سولفیدی و اکسیدی حاصل شده است (شکل ۵-D). توالی پاراژنتیکی کانسار واجارو در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. تصاویر ماکروسکوپی از ماده معدنی و بافت کانی‌سازی در محدوده مس واجارو، A: رگچه‌های ملاکیتی در سطوح شکستگی سنگ میزبان آندزیت، B: تشکیل ملاکیت، کالکوسیت و مقادیر کمی آزوریت در سطح شکستگی واحد آندزیتی، C: رگچه‌های کلسیتی همراه با مواد معدنی در سنگ میزبان آندزیت.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از سنگ میزبان کانی‌سازی و دگرسانی‌های موجود در منطقه واجارو، A: سنگ میزبان آندزیت حاوی فنوکریستالهای پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از شیشه و میکروولیت، نمونه مربوط به سطح می‌باشد، B: دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ میزبان آندزیتی که پلاژیوکلاز از مرکز در حال تجزیه به کلریت است، نمونه مربوط به عمق ۱۰ متری از گمانه Bh3، C: واحد آندزیتی که به شدت دگرسانی شده و به سرپسیت و هیدروکسید آهن تبدیل شده است، نمونه مربوط به سطح است، D: واحد آندزیتی که متحمل دگرسانی سرپسیتی شده و حاوی رگچه‌های کربناتی است، نمونه مربوط به سطح می‌باشد، (کلسیت: Cal، پلاژیوکلاز: Pl). حروف اختصاری نشانگر کانیها، (Whitney and Evans, 2010).

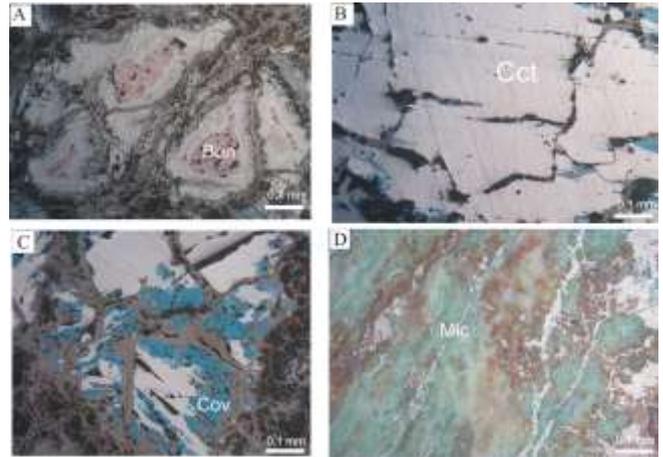
۳-۴ کانه‌زایی و کانی‌شناسی

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، کانی‌سازی اکسیدی-سولفیدی مس واجارو در واحدهای آتشفشانی-آذرآواری با فعالیت‌های سیالات گرمایی مرتبط می‌باشد. این سیالات از طریق شکستگی‌های موجود در منطقه به سطح زمین راه یافته و کانی‌سازی اکسیدی-سولفیدی مس از نوع رگه‌ای را ایجاد کرده است. سنگ میزبان کانی‌سازی از نوع آندزیت و آندزیت-بازالت ائوسن می‌باشد که متحمل دگرسانی‌های هیدروکسید آهن، سرپسیتی و پروپیلیتیک شده است. کانی‌سازی با پهنای ۱۰ تا ۳۰ متر و طول ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. کانی‌سازی در سطح شامل ملاکیت، آزوریت، کوپریت، کالکوسیت و کولیت است. جهت مطالعات کانی‌شناسی ماده معدنی و باطله و روابط بین کانی‌ها ۳۵ مقطع نازک و صیقلی تهیه و مورد بررسی قرار گرفت.

کانی‌سازی به صورت رگه و رگچه‌ای، پراکنده و پرکننده فضاهای خالی در سنگ میزبان تشکیل شده است (شکل ۴-A, B). رگچه‌های کلسیتی با ضخامت ۱ میلی‌متر تا ۶ سانتی‌متر همراه با ماده معدنی شکستگی‌ها را پر کرده و ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی در منطقه نشان می‌دهد (شکل ۴-C). مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد، کانی‌های اصلی مس به صورت کانی‌های کربناتی و سولفیدی نظیر ملاکیت، آزوریت و کالکوسیت بوده که با مقادیر اندکی کالکوپیریت و مگنتیت همراه بوده است. ماده معدنی در سطح شکستگی‌ها و حفرات سنگها را پر کرده است و در عمق اغلب در داخل حفرات و شکستگی‌های بسیار ریز کانی‌هایی مانند هورنبلند و

میزبان، نشان می‌دهد که روش‌های ژئوفیزیکی مناسب برای تشخیص کانی‌های سولفیدی روش مقاومت ویژه و قطبش القایی است (Sultan et al., 2009; Evard et al., 2018). آرایش الکتروود دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی با فاصله الکتروودی ۱۰ متر با ۲۲۲۵ برداشت بر روی ۶ پروفیل با روند NE-SW طراحی و برداشت شده است (شکل ۲). مدل-سازی‌ها توسط نرم‌افزار RES2DINV انجام شده است.

جهت مقایسه بهتر روند کانی‌سازی مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی پروفیل‌های غربی و شرقی در دو شکل مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۷ پروفیل‌های شرقی منطقه را نشان می‌دهد، در پروفیل P01 یک بی‌هنجاری بزرگ در مقطع بارپذیری مشاهده می‌شود؛ بی‌هنجاری A در فاصله ۳۰ تا ۱۵۰ متری از مبدا قرار گرفته است که تا عمق ۴۵ متری ادامه یافته است و در این فاصله مقدار مقاومت ویژه کاهش یافته است. این داده‌ها حضور احتمالی کانی‌سازی در این ناحیه را محتمل نشان می‌دهد. همچنین دو گسل و شکستگی a, b (احتمالی) نیز در مقطع مقاومت ویژه مشاهده شده است. در پروفیل P02 کانی‌سازی تا عمق ۱۰ متری مشاهده می‌شود که حضور کانی‌سازی افشان را به صورت سطحی نشان می‌دهد. همچنین محل گسل احتمالی نیز بر روی این پروفیل مشاهده شده است. پروفیل P03 دو بی‌هنجاری را نشان می‌دهد، بی‌هنجاری A در فاصله ۵۰ تا ۱۴۰ متری که از عمق ۱۰ متری بارپذیری افزایش یافته و مقدار مقاومت ویژه کاهش یافته است و حضور کانی‌سازی افشان را در عمق محتمل می‌کند. بی‌هنجاری B در فاصله ۲۷۰ تا ۳۰۰ متری از مبدا تا عمق ۵۰ متری مشاهده می‌شود که به سمت عمق مقدار بارپذیری کاهش می‌یابد و در همین فاصله مقدار مقاومت ویژه کاهش یافته و احتمال کانی‌سازی را به صورت رگه‌ای محتمل می‌نماید. دو گسل احتمالی نیز در مقطع مقاومت ویژه مشاهده می‌شود.



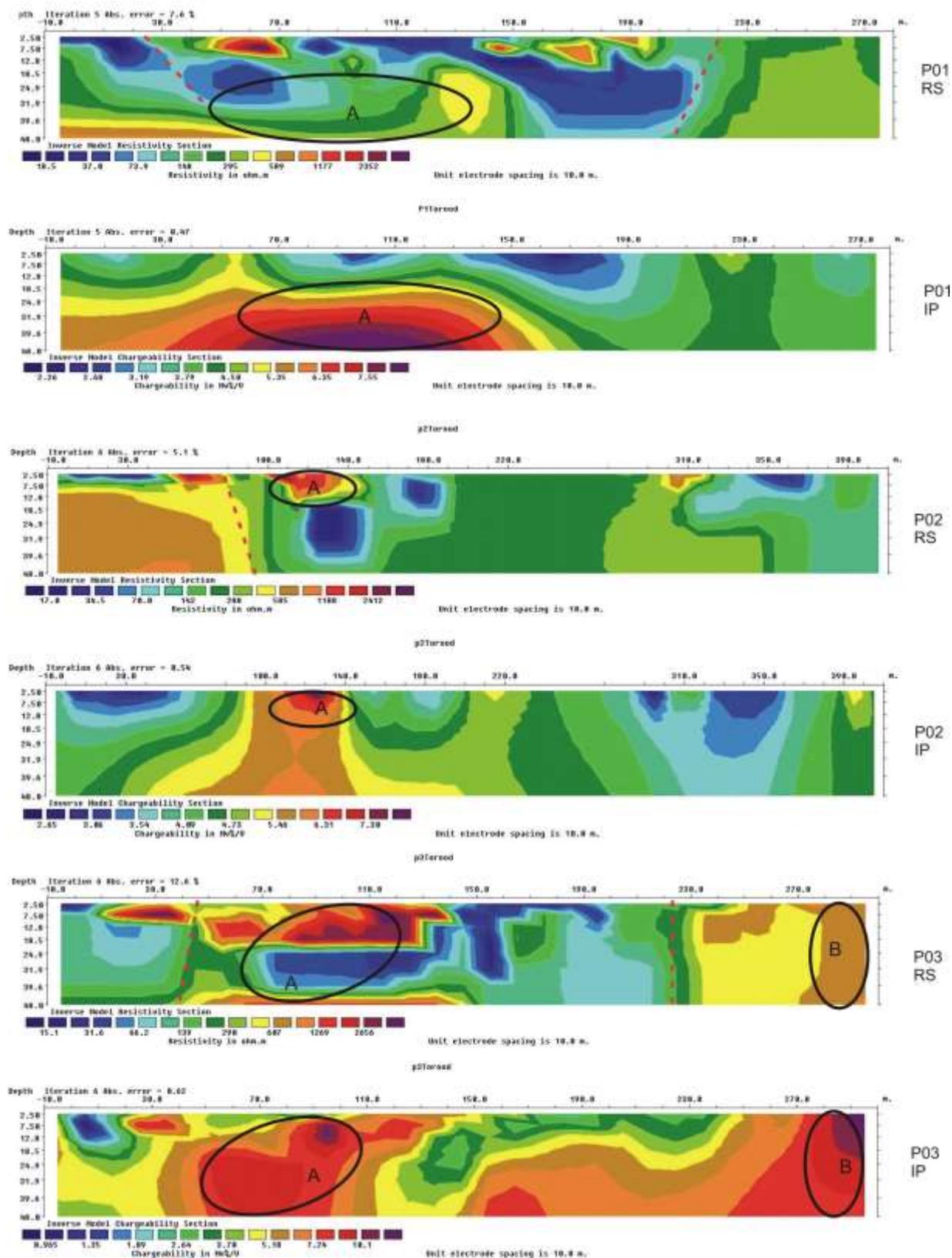
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌سازی مس واجارو، A: بلورهای بورنیت که در حال تجزیه به کالکوسیت می‌باشد، نمونه مربوط به گمانه Bh1 و عمق ۱۵ متری است، B: بلورهای درشت کالکوسیت در سنگ میزبان آندزیت، نمونه مربوط به گمانه Bh5 و عمق ۱۲ متری است، C: بلورهای کالکوسیت که در حال تجزیه به کوولیت است، نمونه از عمق ۵ متری مربوط به گمانه Bh2، D: شکستگی‌های پر شده با کالکوسیت و مالاکیت، نمونه مربوط به سطح است، (بورنیت: Bon، کالکوسیت: Cct، کوولیت: Cv، مالاکیت: Mlc).

Minerals	Hypogene Stage	Supergene Stage
Calcite	—	
Quartz	—	
Magnetite	---	
Chalcopyrite	---	
Bornite	—	
Chalcoelite	--- —	---
Native Copper	---	
Covellite		---
Cuprite		---
Malachite		—
Azurite		—
Geothite		---

شکل ۶. توالی پاراژنتیکی مراحل کانی‌سازی در منطقه واجارو.

۵- مطالعات ژئوفیزیکی

مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی در منطقه واجارو نشان می‌دهد، کانی‌سازی اکسیدی-سولفیدی مس به صورت پراکنده، رگه و رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی است. ویژگی‌های ذکر شده در کانی‌سازی و سنگ

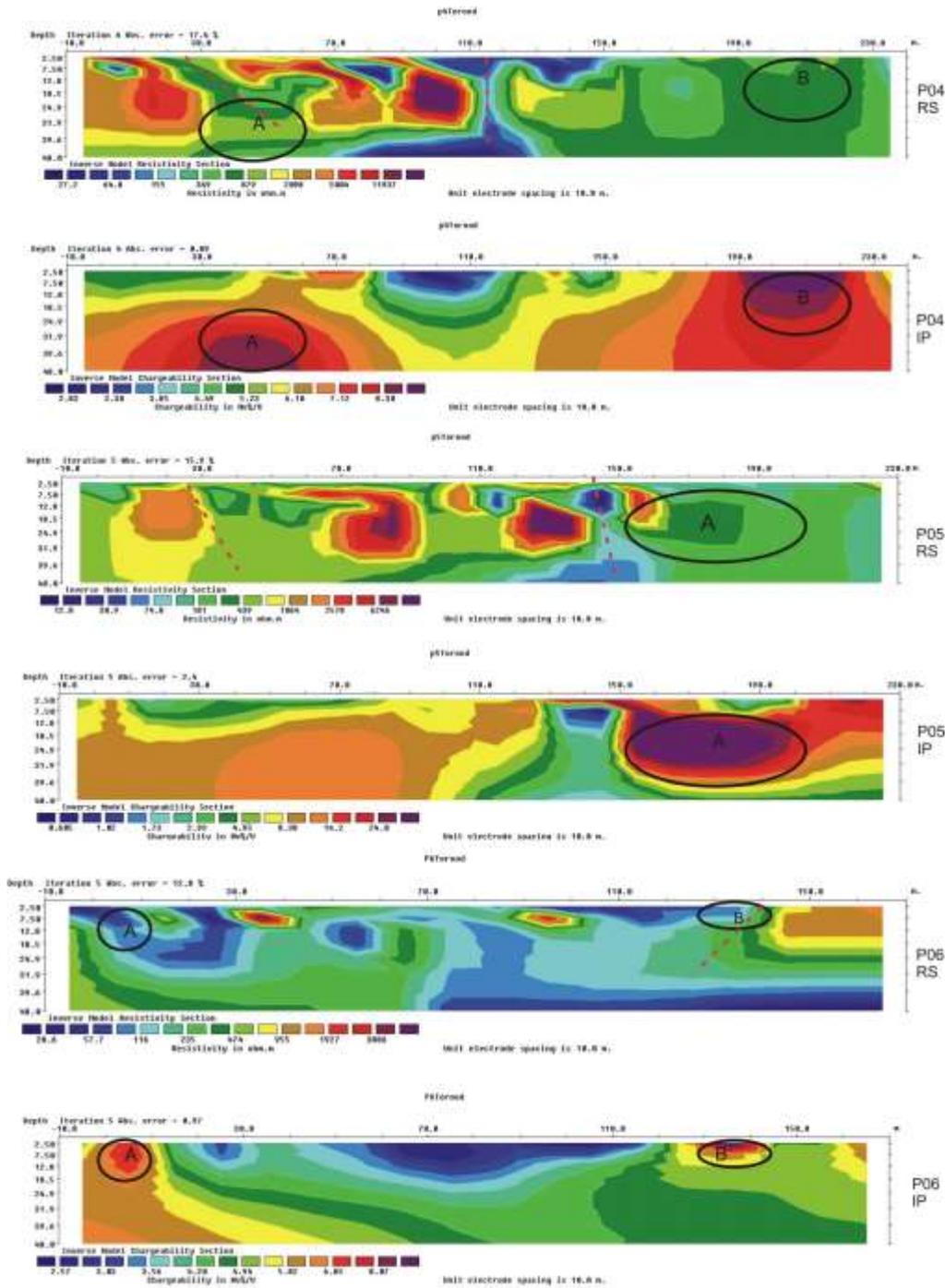


سمت عمق مقدار بارپذیری افزایش یافته است. در این فاصله مقاومت در مقطع مقاومت ویژه متوسط است؛ که می‌توان حضور کانی‌سازی در این فاصله را محتمل دانست. بی‌هنجاری B در فاصله ۹۰ تا ۲۳۰ متری مشاهده می‌گردد که مقدار آن تا عمق ۲۰ متر افزایش یافته و بعد حالت نزولی پیدا کرده است، در این فاصله مقدار مقاومت ویژه پایین است. در مقطع مقاومت ویژه یک شکستگی و یا گسل مشاهده می‌شود که شواهد

شکل ۷. مدل دوبعدی القایی و مقاومت ویژه در پروفیل‌های بخش شرقی منطقه شامل پروفیل‌های P01, P02, P03
شکل ۸ سه پروفیل بخش غربی منطقه را نشان می‌دهد، بر روی پروفیل P04 دو بی‌هنجاری قابل مشاهده است. بی‌هنجاری بزرگ A در مقطع IP در فاصله ۲۰ تا ۸۰ متری قرار دارد که از عمق ۲۵ متری شروع شده و به

یافته است، همچنین دو شکستگی احتمالی نیز قابل مشاهده است. بر اساس نتایج داده‌های ژئوفیزیک و زمین‌شناسی، ۶ گمانه حفاری در منطقه انجام گرفت و نتایج این داده‌ها حضور کانی‌سازی مس را در عمق تایید کرد. نتایج داده‌های حفاری گمانه‌ها مقادیر مس را با عیار ۱ تا ۳ درصد در عمق‌های ۵۰، ۵۵، ۹۲ و ۱۲۵ متری نشان می‌دهد.

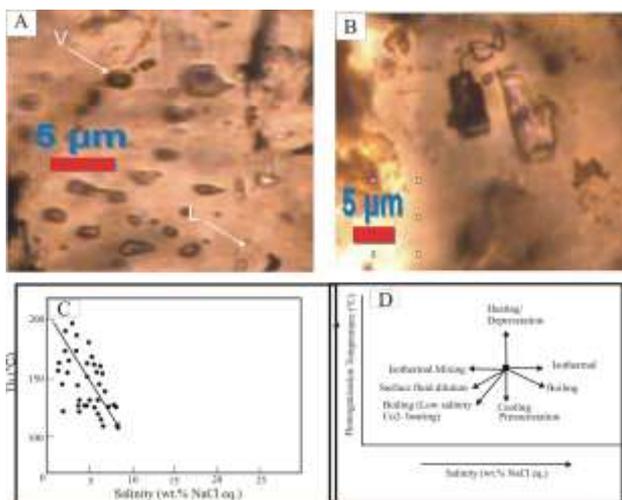
در پروفیل P05 بی‌هنجاری A در پروفیل P05 بی‌هنجاری A در فاصله ۱۵۰ تا ۲۲۰ متری قابل مشاهده است که از عمق ۴۰ متری بارپذیری کاهش یافته است و در همین فاصله مقاومت ویژه نیز پایین است که می‌تواند نشان دهنده کانی‌سازی احتمالی باشد. همچنین مقطع مقاومت ویژه دو شکستگی احتمالی را نیز نشان می‌دهد. بر روی پروفیل P06 دو بی‌هنجاری سطحی مشاهده می‌گردد که تا عمق ۱۰ متری ادامه



شکل ۸. مدل دوبعدی القایی و مقاومت ویژه در پروفیل‌های بخش غربی منطقه شامل پروفیل‌های P04, P05, P06

۶- بررسی سیالات درگیر

می‌دهد، داده‌ها در محدوده جوشش قرار گرفته‌اند (شکل ۹-C, D). فرایند موثر در تغییرات شوری آمیختگی و جوشش می‌باشند که حضور میان‌بارهای غنی از سیال و غنی از بخار در مجاورت یکدیگر تاییدی بر فرایند جوشش در نمونه‌های منطقه واجارو است (شکل ۹-A). این فرایند نشان می‌دهد سیالی با دمای بالا و شوری پایین، طی فرایندی جوشش به سیالی با دمای پایین و شوری بالا تبدیل شده است.



شکل ۹. تصاویری از میان‌بارهای سیال در کانسار واجارو، (A) اشکال مختلف میان‌بارهای سیال غنی از مایع (L) همراه با میان‌بار غنی از بخار (V)، که از نوع اولیه هستند، پراکندگی میان‌بارهای اولیه غنی از بخار (V) در ابعاد متفاوت در کلسیت، (C) پراکندگی مقادیر میان‌بارهای سیال بر روی نمودار دما در برابر شوری، (D) نمودار دمای همگن‌شدگی در برابر شوری (Wilkinson, 2001).

۷- بحث

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در محدوده واجارو نشان می‌دهد؛ تشکیل کانی‌سازی و دگرسانی‌های موجود در منطقه توسط چرخش سیالات گرمایی صورت گرفته است. سیالات داغ در نواحی عمیق و سطحی حین چرخش در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری در منطقه باعث تشکیل دگرسانی‌های محلی و ناحیه‌ای هیدروکسید آهن، سریسیتی-کربناتی و پروپیلیتیک شده‌اند. مطالعات صحرایی نشان می‌دهد؛ کانه‌زایی در عمق‌های کم صورت گرفته و توسط شکستگی‌ها و گسل‌های محلی کنترل شده‌اند. کانی‌سازی به صورت کانی‌های کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت، کولیت و هیدروکسیدهای آهن بوده که همراه با رگچه‌های کلسیتی شکستگی‌ها را پر کرده‌اند.

نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی حاکی از کانی‌سازی‌های سطحی (تا ۲۰ متر) و عمقی (تا ۵۰ متر و یا بیشتر) می‌باشد. کانی‌سازی در سطح گسترش چندانی نشان نمی‌دهد و به نظر می‌رسد از روند شکستگی‌های کوچک تبعیت کرده است؛ ولی کانی‌سازی در عمق عمدتاً گسترش بیشتری نشان می‌دهد و فرم لایه‌ای و یا عدسی‌های کشیده را نشان می‌دهد.

به‌منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال و بررسی روند تغییرات شیمیایی و دمای سیال کانه‌ساز، ۷ نمونه از رگچه‌های کلسیتی مرتبط با کانی‌سازی از گمانه‌های حفاری و ترانشه‌های سطحی انتخاب شد و مقاطع دوبر-صیقلی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر تهیه گردید. پس از مطالعات پتروگرافی ۴ نمونه جهت اندازه‌گیری‌های میان‌بارهای سیال انتخاب شد (جدول ۱).

مطالعات پتروگرافی میان‌بارهای سیال بر اساس معیارهای رودر (Roedder, 1984) انجام گرفت. شکل غالب این میان‌بارها بیضوی، نامنظم، کشیده و کروی هستند و اندازه آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است. چهار نوع میان‌بار شامل دوفازی غنی از بخار، دوفازی غنی از مایع، تک فازی غنی از بخار و تک فازی غنی از مایع تشخیص داده شد؛ که درجه پراکندگی میان‌بارهای سیال بین ۰/۵ تا ۰/۸ است (شکل ۹-A, B). آزمایش‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای اولیه و غنی از مایع انجام گرفت. در مطالعات پتروگرافی هیچ شاهدهی از حضور CO₂ مایع و گاز و همچنین کانی‌های نوزاد مشاهده نشد. میان‌بارهای مقاطع مورد مطالعه از نوع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب می‌باشند که برای اطمینان از صحت داده‌ها، اندازه‌گیری‌ها بر روی میان‌بارهای اولیه انجام گرفت.

آزمایش همگن‌سازی بر روی ۴۹ میان‌بار انجام شد که دارای دمای بین ۱۲۱ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ذوب یخ بین ۱/۱- تا ۵/۸- درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است (جدول ۱). دمای ذوب یخ با نقطه اوتکتیک کمتر از ۳۰- درجه سانتی‌گراد است. میزان شوری‌های به‌دست آمده (معادل درصد وزنی کلرید سدیم) بین ۱/۸ تا ۸/۹ درصد وزنی معادل نمک طعام است. نمودار تغییرات دمای همگن‌شدگی و شوری سیالات درگیر در نمونه‌های کلسیت در شکل ۷ آورده شده است. میانگین شوری سیال ۶/۴ درصد وزنی نمک طعام و میانگین دما ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد است.

جدول ۱. داده‌های میان‌بار سیال برای کانی کلسیت در منطقه واجارو. نمونه‌ها مربوط به سطح (S1, S2) و گمانه (Bh1, Bh3) و از عمق‌های ۲۳ تا ۳۱ متری برداشت شده است.

Sample No.	Mineral	FI Type	N	Th Range	Th Avg.	Tm Range	Salinity Range	Salinity Avg.	Phases
S1	Calcite	P	11	136-178	166	-1.1, -3.6	1.8-5.7	6	L>V
BH1-23	Calcite	P	13	121-187	168	-3.5, -5.8	5.6-8.9	5.1	L>V
BH3-31	Calcite	P	15	143-200	159	-3, -5.2	4.78-8	6.2	L>V
S2	Calcite	P	10	128-195	166	-3.6, -4.8	5.7-7.5	8.1	L>V

پراکندگی داده‌های میان‌بارهای سیال بر روی نمودار تغییرات دما نسبت به شوری و مقایسه آن با نمودار ویلکینسون (Wilkinson, 2001) نشان

واحدهای رسوبی تبخیری و حوضه‌ای کم‌عمق که در واحدهای ائوسن منطقه حضور داشته‌اند (نظیر واحد مارن و تبخیری‌های ائوسن میانی براساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی تروود)، باعث بالاتر رفتن شوری سیال گردیده و سیالی با شوری متوسط را تشکیل داده‌اند (e.g., Oyarzun et al., 1998).

با توجه به نمودارهای شکل ۹ (نمودار شوری در برابر دمای منطقه واجارو و ویلکینسون)، منطقه کانی‌سازی واجارو حاصل اختلاط سیال هیدروترمال گرم و شور با آبهای جوی سرد صورت گرفته‌است (Oyarzun et al., 1998). نتایج این نمودار نشان می‌دهد، سیالی با دمای بالا و شوری پایین طی فرایند جوشش به سیالی با دمای پایین و شوری بالا تبدیل شده‌است و در نهایت منجر به ته نشست کانی‌سازی در منطقه گشته‌است. تغییرات دمای همگن‌شدگی در دامنه ۱۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد و شوری‌های بین ۲ تا ۴۰ درصد وزنی نمک طعام در میان-بارهای سیال از ویژگی‌های این نوع ذخایر هستند (Kojima, 2008). این ذخایر به دلیل عبار بالای مس، تشکیل در عمق کمتر از ۱ کیلومتر و همراهی با فلزات گرانبها از اهمیت بالایی برخوردار هستند. سامانی (Samani, 2002) فاز پسیسین ولکانیسم ائوسن در منطقه تروود-عباس آباد و قم- ساوه را عامل اصلی این نوع کانی‌سازی می‌داند.

با توجه به نوع سنگ میزبان، شکل کانسار، ترکیب کانی‌شناسی سنگ میزبان این ذخیره بسیار شبیه کانسارهای نوع مانتو در شیلی می‌باشد (Kojima et al., 2003; Wilson and Zentilli, 2006) که ذخایری با ویژگی‌های مشابه با تیپ مانتو در آمریکا و کانادا تحت عنوان طبقات سرخ آتشفشانی و میشیگان معرفی شده‌اند (Cabral and Beauoin, 2007). ذخایر تیپ مانتو با دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی، سریسیتی، آلبیتی و زئولیتی همراه هستند و کانی‌سازی اغلب به صورت پراکنده، رگچه‌ای و پراکنده حفرات سنگ میزبان تشکیل می‌شوند که با کانیهای پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کولیت، مس طبیعی، هماتیت و مقادیری نقره همراه هستند.

۸- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد؛ کانی‌سازی مس واجارو در افق خاصی از سنگهای آتشفشانی تشکیل شده‌است (واحدهای ائوسن) و در گروه کانی‌سازی‌های مس چینه‌کران (نوع مانتو) قرار می‌گیرد. کانی‌سازی در دو افق سطحی (به شکل رگه‌ای) و عمقی (به شکل لایه‌ای) تشکیل شده‌است؛ که فاز غالب کانی‌سازی سطحی اکسید مس و فاز غالب کانی‌سازی در عمق سولفیدی است. نتایج مطالعات ژئوفیزیک امتداد کانی‌سازی در عمق را نشان داده است که با حفاری‌های انجام شده

دهد. نتایج این مطالعات با مشاهدات صحرایی و کانی‌سازی در رگچه‌ها و شکستگی‌ها مطابقت دارد. تصاویر پروفیل‌های نیمه شرقی منطقه (شکل ۷) نشان می‌دهد پروفیل P01 با محل کانی‌سازی منطبق است ولی پروفیل P02 شواهد کانی‌سازی در عمق را نشان نمی‌دهد در حالیکه پروفیل P03 نیز کانی‌سازی در عمق را نشان می‌دهد که در نقشه زمین-شناسی آثاری از کانی‌سازی مشاهده نشده است. این نکته می‌تواند نشان دهنده ادامه کانی‌سازی در امتداد نیمه شرقی باشد که نیاز به طراحی و مطالعات جدیدتر ژئوفیزیک در منطقه و انجام عملیات حفاری بر روی پروفیل P03 است. در نیمه غربی منطقه (شکل ۸) مناطق کانی‌سازی به‌خوبی با شواهد کانی‌سازی در سطح همخوانی داشته و حفاری‌های انجام شده در نیمه غربی منطقه کانی‌سازی در عمق را تایید کرده است.

مطالعات میان‌بارهای سیال منطقه واجارو نشان می‌دهد، کانی‌سازی در دامنه دما ۱۲۱-۲۰۰ (میانگین ۱۶۴) درجه سانتی‌گراد و شوری‌های پایین تا متوسط در دامنه ۱/۱ تا ۸/۹ (میانگین ۶/۴) درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده است. نمودار دما در برابر شوری حاصل از میان-بارهای سیال (شکل ۹) نشان می‌دهد، تغییرات شوری و دما در دامنه نسبتاً وسیعی صورت گرفته است که می‌تواند ناشی از دو مکانسیم مهم اختلاط و جوشش سیال باشد (Oyarzun et al., 1998). این دو فرایند مهم در تشکیل کانی‌سازی سیستم‌های گرمایی نقش اساسی ایفا می‌نمایند (Seward, 1973). مهمترین شواهد در سیستم‌های هیدروترمال شامل حضور برشهای گرمایی، همزمانی میان‌بارهای غنی از بخار و غنی از مایع، حضور کلسیت تیغه‌ای (در ذخایر اپی‌ترمال) و فراوانی میان‌بارهای با شوری بالا می‌باشند (Oyarzun et al., 1998; Simmons and Brown, 2000). از آنجا که شواهد جوشش سیال در منطقه واجارو محدود می‌باشد و به حضور همزمان میان‌بارهای غنی از بخار و غنی از مایع محدود می‌شود (عدم حضور برش‌های هیدروترمال، کلسیت‌های تیغه‌ای و شوری-های بالا)؛ لذا می‌توان گفت این فرایند نقش چندان مهمی در ته‌نشست مواد معدنی در منطقه واجارو نداشته است؛ لذا می‌توان گفت فرایند اختلاط دو سیال با شوری پایین و دمای بالا و شوری بالا و دمای پایین می‌تواند منجر به تشکیل کانی‌سازی در منطقه شده باشد (e.g., Wilson et al., 2003). از آنجا که شوری‌های بالا می‌تواند با شورابه‌های حوضه‌ای، آبهای جوی در تعادل با واحدهای تبخیری و یا منبع ماگمایی مرتبط باشند (Simmons and Brown, 2000; Albinson et al., 2001). لذا می‌توان گفت آبهای جوی با شوری‌های پایین نمونه بارز سیستم‌های زمین‌گرمایی می‌باشند (e.g., Henley, 1985). با توجه به اینکه که سیال تشکیل‌دهنده کانی‌سازی در منطقه واجارو دارای شوری‌های پایین تا متوسط می‌باشد؛ لذا می‌توان گفت چرخش آبهای گرم در بین

Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita*, 33(6): 547-559.

-Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.H. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy*, V. 12. Mineralogical Society of America, Vancouver, 644 PP.

-Salehi, L., Rasa, I., Alirezai, S. and Kazemi Mehrnia, A., 2016. The Madan Bozorg, volcanic-hosted copper deposit, East Shahroud; an example of Manto type copper deposits in Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 98 (4): 93-105. (in Persian with English abstract).

-Samani, B., 2002. Metallogenic of the Manto type copper deposit. 6th Geological Society of Iran Conference, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

-Shamanian, G.H., Hedenquist, J., Hattori, K. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandi and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. *Economic Geology*, 99(4): 691-712.

-Simmons, S.F. and Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: Implication for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, 95(5): 971-999.

-Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229-1258.

-Sultan, S.A., Mamsour, S.A., Santos, F.M., and Helaly, A.S., 2009. Geophysical exploration for gold and associated minerals, case study: Wadi El-Beida area, South Eastern Desert, Egypt, *Geophysics Engineering* 6:343-356.

-Tavasoli, A. and Lotfi, M., 2007. Mineralization and tectonomagmatic environment of the Choghondar Sar, east Semnan. 26th Earth Science Conference, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

-Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95 (1): 185-187.

-Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4): 229-272.

-Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 2006. Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chile. *International Journal of Coal Geology*, 68(3):158-169.

کانی‌سازی در عمق نیز تایید گردید.

منابع

-Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, scale 1:5,000,000. Geological Survey of Iran.

-Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001. Control on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constrain from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Inc, Special Publication 8, Littleton, 1- 32pp.

-Cabral, A.R. and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexander, Quebec Appalachians, Canada. *Mineralium Deposita*, 42(8): 901-912.

-Ebrahimi, S., Arab-Amiri, A.A., Kamakr Rouhani, a., 2019, Geological and Geophysical Studies of Sulfide Copper Mineralization in the Dochileh Area: An Example of Manto-Type Deposit in the Sabzevar Zone, Iran, *Resource Geology*, 70, 125-140pp.

-Ebrahimi, S., Arab-Amiri, A., Ghanbari, H., 2020, Mineralogy, alteration, fluid inclusion and stable isotope studies of the Sharifabad-Bardaskan copper deposit, NE Iran, *Scientific Quarterly Journal*, v. 30, 135-146.

-Ebrahimi, S., 2019, Mineralization and fluid inclusion characteristics of Pirmardan stratabound copper deposit (Manto Type), SW Shahroud, *Journal of Economic Geology*, v. 11. 457-471.

-Evard, M., Dumont, T., Hemmans, M., Chouteau, O., Pirard, E., and Nguyen, F., 2018. Geophysical investigation of the Pb-Zn deposit of Lontzen-Poppelsberg, Belgium. *Minerals*, 8:233.

-Hushmandzadeh, A.R., Alavi Naini, M. and Haghypour, A.A., 1978. Evolution of geological phenomenon in Totud area. Geological Survey of Iran, Tehran, Report H5, 136 pp. (in Persian).

-Imamjomeh, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnejad Omran, N., 2008. An introduction to individual disseminated-veinlet and vein mineralization system of Cu (Pb-Zn) in the Chahmoosa- Gholekaftaran mining district, eastern part of Toroud- Chahshirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 70(4): 112-125. (in Persian with English abstract).

-Kamali, 2020. Exploration studies on the Namakazar area, Ms.C. Thesis, Shahrood University of Technology, 98p.

-Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. and Hayashi, K.I., 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of stratiform copper deposits in the coast Corillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38(2): 208-216.

-Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. and Oyarzun, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada