

بررسی‌های کانی‌شناسی و شاره‌های درگیر در کانسار چندفلزی ماهور شرق بلوک لوت، ایران مرکزی

رضوان میرزایی راینی^{۱*}، علی احمدی^۱، حسن میرنژاد^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۲۵، نسخه نهایی: ۹۰/۴/۲۵)

چکیده: کانسار چندفلزی ماهور در ۱۴۵ کیلومتری غرب شهرستان نهبندان و در سنگ‌های اسیدی نیمه‌عمیق تشکیل شده است. کانه‌سازی در منطقه در راستای یک رگه به طول سه کیلومتر رخ داده است. از سطح به عمق مناطق فروشست (تشکیل مالاکیت، آزوریت، همتیت، گوتیت و لیمونیت)، برون‌زاد یا سوپرژن (تشکیل بورنیت، کوولیت و کالکوسیت) و درون‌زاد یا هیپوژن (تشکیل مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت) قابل مشاهده‌اند. غالب‌ترین دگرسانی‌ها شامل دگرسانی سیلیسی، سریسیتی و پروپیلیتی هستند. کانی‌های باطله بیشتر از کوارتز و کلسیت تشکیل یافته‌اند. بافت جانشینی، شکافه پرکن و برشی از مهم‌ترین بافت‌های کانی‌سازی هستند. بررسی‌های شاره‌های درگیر روی سه نمونه از کانی اسفالریت، حاکی از تغییرات دمایی شاره‌ی کانه‌ساز بین ۱۹۴ تا ۲۹۲ درجه‌ی سانتی‌گراد است. با توجه به دمای ذوب آخرین بلور یخ شاره‌ی کانه‌ساز، شوری شاره‌ی درگیر ۱۱/۷ تا ۲۳ درصد وزنی معادل نمک طعام (NaCl) برآورد می‌شود. شواهد موجود مانند بافت و ساخت کانسار، شکل رگه‌ای کانسار، نوع همراهی کانه‌ها، کانی‌های باطله، دگرسانی سنگ‌های دیواره، عمق کانه‌سازی، دمای همگن‌شدن و شوری، کانسار ماهور را در رده‌ی کانسارهای اپی ترمال نوع رگه‌ای تا مزوترمال قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: چندفلزی، دگرسانی، شاره‌های درگیر، کانسار ماهور.

مقدمه

گستره‌ی پی‌جویی ماهور در مختصات جغرافیایی ۵۲° ۵۸' تا ۵۹° طول شرقی و ۱۱° ۳۱' تا ۳۱° ۳۰' عرض شمالی قرار گرفته است. این گستره در شرق بلوک لوت و ۱۴۵ کیلومتری غرب شهرستان نهبندان در منتهی‌الیه بخش جنوبی استان خراسان جنوبی واقع شده است. بر اساس بررسی‌های صحرایی و حفاری‌های انجام شده در این منطقه، کانه‌سازی در راستای یک رگه‌ی نیمه‌عمیق آپلیتی - گرانوفیری با روند شمالی- جنوبی و شیب حدود ۸۰ درجه به سمت شرق رخ داده است. طول رگه سه کیلومتر و عرض آن از ۰/۵ تا ۲ متر متغیر است.

کانسارهای مهم ایران غالباً در شش منطقه‌ی ساختاری (ارومیه دختر، البرز غربی، کویر سبزه وار، سبلان، لوت و مکران) واقع شده‌اند [۱]. هرچند منطقه‌ی آتشفشانی ارومیه دختر مهم‌ترین پهنه‌ی کانسارسازی مس و میزبان بزرگترین کانسارهای مس پورفیری از جمله میدوک و سرچشمه است، ولی با توجه به حجم عظیم فعالیت‌های ماگمایی و شرایط زمین‌ساختی خاص بلوک لوت می‌توان انتظار ذخایر متنوعی از کانسارهای مختلف را، به‌ویژه در بخش‌های شرقی تکتونیزه آن، داشت.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۳۳۹۷۹۲۳۲، پست الکترونیکی: Rezvanmirzaei.64@gmail.com

مجموعه‌ای از اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن در اثر هوازدگی روی سطح کانسنگ به وجود آمده و راهنمای مناسبی را برای پی‌جویی کانسار به وجود آورده‌اند. کانه‌سازی‌های متفاوتی از عناصر مس، سرب و روی در راستای رگه قابل مشاهده است.

با توجه به اینکه کانسار ماهور اخیراً پی‌جویی شده و فعالیت‌های پی‌جویی روی این کانسار پایان پذیرفته است، لذا این پژوهش به منظور شناسایی کانه‌های فلزی موجود در منطقه، تعیین پتانسیل کانه‌زایی و دمای تشکیل کانه‌های فلزی با محلول‌های گرمایی و با استفاده از بررسی شاره‌های درگیر برای اولین بار صورت پذیرفته است.

زمین شناسی عمومی منطقه

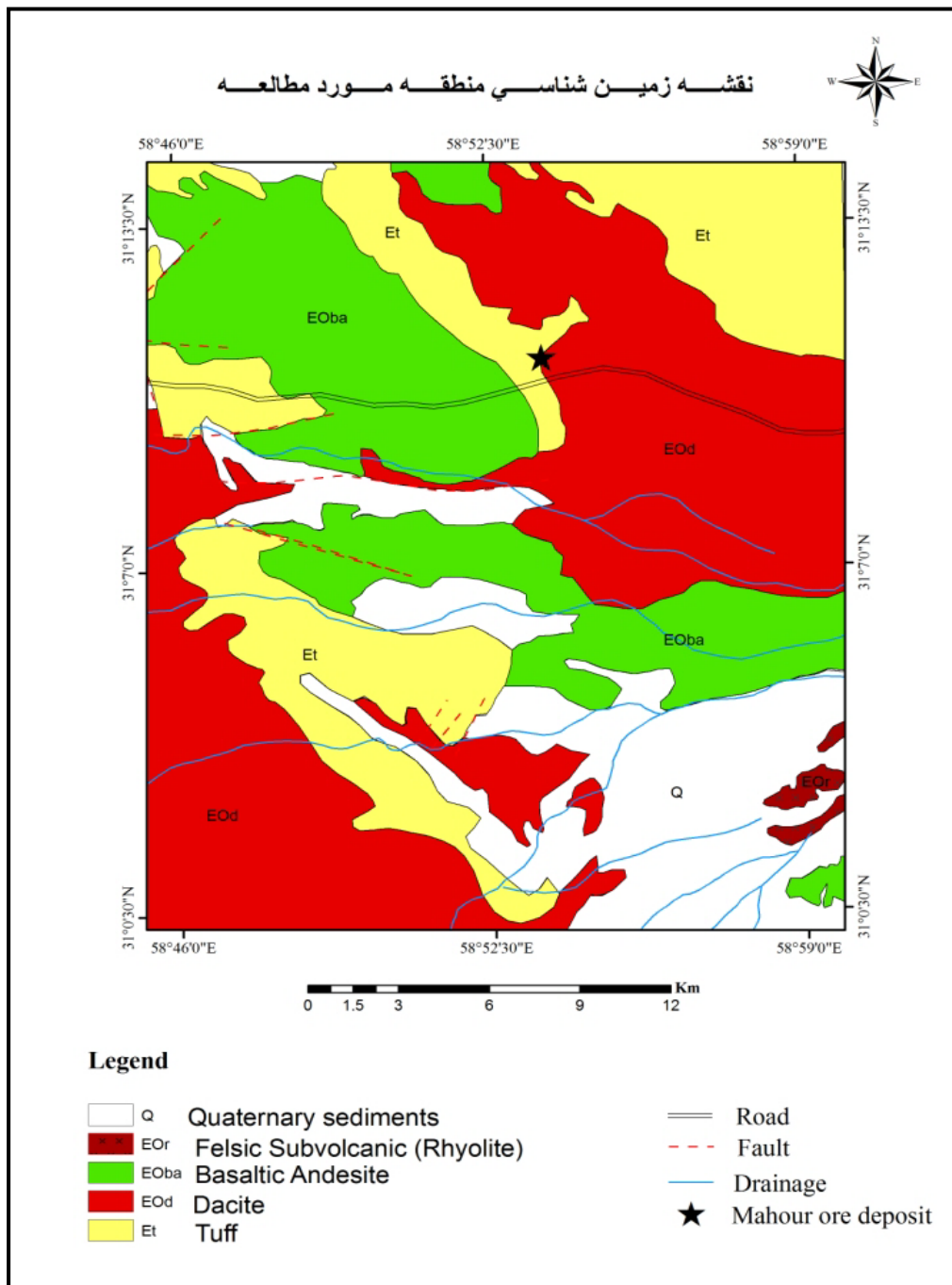
دوران سنوزوئیک در ایران با ماگماتیسم گسترده و کانسارزایی وابسته به آن همراه بوده است. ماگماتیسم بلوک لوت از ژوراسیک به بعد با نفوذ توده‌های نفوذی مانند سرخکوه و چند پیکره‌ی دیگر، آغاز شده و در ترشیری با فوران‌های آتشفشانی به اوج خود رسیده است، به طوری که ضخامت واحدهای آتشفشانی ترشیری در بلوک لوت حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر برآورد شده و کانسارهای شرق ایران نیز غالباً در رابطه با همین فعالیت‌های ماگمایی تشکیل شده‌اند [۲]. تشکیلات آتشفشانی دوران سوم که به بیشتر ترکیب آندزیتی-داسیتی دارند بخش بیشتر بلوک لوت را می‌پوشانند. کانسار ماهور در گستره نقشه‌ی زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ ده سلم (چاهوک) واقع شده است [۳]. واحدهای آذرین موجود در منطقه‌ی مورد بررسی شامل سه واحد بازالت، توف و داسیت و به سن ائوسن و یک واحد به سن کواترنر است که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم (شکل ۱). مجموعه‌ی آتشفشانی بازالتی شامل آندزیت - بازالت و بازالت به رنگ خاکستری تیره تا سیاه در بخش غربی این گستره گسترش دارد. واحد سنگی دیگر به سن ائوسن شامل توف به رنگ سبز و خاکستری و با ترکیب متوسط تا اسیدی، گدازه‌های داسیتی، گدازه‌های آندزیتی، توف و سنگ‌های آتشفشانی، توف جریان‌ی و ماسه سنگ‌اند که در بخش‌های شمالی و بخش‌هایی از مرکز گستره‌ی دارای رخنمون محدود است. این توف بیشتر از توف لیتیک است و در سطح به صورت برشی، سیلیسی و پیریتی دیده می‌شود. دگرسانی سنگ‌ها در

این بخش به خوبی قابل مشاهده است. واحد سنگی دیگر داسیت بوده که با رنگ روشن بیشترین گسترش و توسعه را در محدوده اکتشافی به نمایش می‌گذارد و قسمت‌های گسترده‌ای از شرق، جنوب و جنوب شرقی گستره را فرا گرفته است. از جمله سنگ‌های موجود در این واحد باید به داسیت و ریوداسیت‌های حاوی پیریت اشاره کرد که با رنگ روشن قابل تفکیک است و به دلیل حفاری‌های فراوانی که در این منطقه انجام شده، بیشترین نمونه‌های برداشت شده وابسته به آن است (شکل ۱). جوان ترین واحد سنگی موجود در منطقه، نهشته‌های آبرفتی (Q)، شامل ماسه، سیلت و رس به سن کواترنر است که بیشترین گسترش را در بخش جنوب غربی این گستره دارند.

روش بررسی

به منظور شناخت مقدماتی منطقه‌ی مورد بررسی، نخست نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ ده سلم (چاهوک) مورد بررسی قرار گرفت و طی چند روز بازدید صحرایی، نمونه برداری از منطقه با استفاده از GPS انجام پذیرفت. تاکنون هدفه حلقه چاه پی-جویی با عمق‌های ۳۰ تا ۱۱۰ متر از سطوح با ریخت‌های متفاوت از سوی شرکت ماهور مس حفاری شدند. به منظور بررسی سنگ‌شناسی سنگ‌های در برگیرنده‌ی کانسار مورد بررسی، شناسایی کانه‌های فلزی و نیز تعیین دگرسانی‌های موجود، تعداد ۱۰۰ نمونه از نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری جمع‌آوری و ۳۴ نمونه برای تهیه مقطع نازک صیقلی انتخاب شدند.

از نمونه‌های اسفالریت موجود در مغزه‌های حفاری نیز برای بررسی شاره‌های درگیر تعداد سه مقطع دو بر صیقل تهیه شدند و ۳۸ میانبار در شرکت مطالعات و پژوهش آذین زمین پویا با میکروسکوپ تحقیقاتی Linkham مدل (TMS 94) و با قابلیت اندازه‌گیری گستره‌ی دمایی 196°C تا $600^{\circ}\text{C}+$ و دقت در دماهای مرجع استاندارد، $0.2 \pm$ درجه‌ی سانتی‌گراد در 56.6°C درجه‌ی سانتی‌گراد (نقطه سه‌گانه‌ی CO_2)، $0.1 \pm$ درجه‌ی سانتی‌گراد در صفر درجه‌ی سانتی‌گراد (نقطه ذوب یخ)، $0.2 \pm$ درجه‌ی سانتی‌گراد در 374.1°C درجه‌ی سانتی‌گراد (همگن‌شدگی بحرانی H_2O)، و $0.9 \pm$ درجه سانتی‌گراد در 573°C درجه سانتی‌گراد (تبدیل کوارتز آلفا به بتا) بوده است.



شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی، برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ده سلم (چاه وک) [۳].

سنگ شناسی توصیفی و دگرسانی سنگ های میزبان

گدازه های آندزیتی و داسیتی حجم قابل توجهی از مجموعه های آتشفشانی منطقه اطراف کانسار را به خود اختصاص داده اند. گدازه های آندزیت و به مقدار کمتر آندزیت- بازالت، دارای درشت بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند. در مقاطع میکروسکوپی دارای بافت پورفیری بوده و کانی های اصلی

تشکیل دهنده ی آن ها به ترتیب فراوانی، عبارتند از پلاژیوکلاز (۵۰ تا ۶۰ درصد)، پیروکسن (۱۰ تا ۱۵ درصد)، کانه های فلزی (۲۰ تا ۲۵ درصد) و به میزان جزئی کلریت که در زمینه ی ریزبلوری و گاه شیشه ای قرار گرفته اند. بلورهای پلاژیوکلاز از ۳۰ تا ۶۰ درصد به سرسیت و کانی های رسی تجزیه شده اند. بلورهای پیروکسن موجود در این سنگ ها به صورت جزئی

پروپیلیتیک قرار گرفته‌اند که از این میان دگرسانی سیلیسی و سریسیتی بیشترین گسترش را دارند. به دلیل ازدیاد سولفیدهای اولیه در شاره‌های کانی ساز، آن مناطق از اکسیدهای آهن ثانویه (گوسان) تشکیل شده است. دگرسانی سیلیسی: این نوع دگرسانی به طور گسترده سنگ‌های داسیتی منطقه را تحت تاثیر قرار داده است. سیلیسی-شدن به صورت انتشاری در بسیاری از نمونه‌ها دیده می‌شود که در این فرآیند سیلیس به صورت دانه‌های بسیار ریز فضای بین کانی‌ها را پر کرده است. نوع دیگر سیلیسی شدن در سنگ‌ها به صورت رگچه‌ای است و در آن سیلیس به صورت رگه‌ای و رگچه‌ای زمینه‌ی سنگ را قطع کرده است. درصد سیلیس از ۲۰ تا ۵۰ درصد متغیر است.

دگرسانی پروپیلیتیک: این دگرسانی که در منطقه‌ی ماهور از گسترش محدودی برخوردار است، به صورت پراکنده شامل مجموعه کانی‌های پلاژیوکلاز، اپیدوت و کانی‌های کربناتی است و بیشتر در توف‌های منطقه مشاهده می‌شود. مقدار پلاژیوکلاز بیش از ۵۰ درصد است. اپیدوت تا ۵ درصد و فراوانی کانی‌های کربناتی از ۲ تا ۱۰ درصد متغیر است.

دگرسانی فیلیک (سریسیتی): دگرسانی فیلیک با جانیشینی بیشتر سیلیکات‌های سنگ‌ساز مانند پلاژیوکلازها و فلدسپات‌های قلیایی با سریسیت و کوارتز به همراه میزان متغیری از پیریت (۲-۴٪ حجم سنگ) مشخص می‌شود. در این نوع دگرسانی، پلاژیوکلاز و فلدسپات قلیایی از ۳۰ تا بیش از ۵۰ درصد به وسیله‌ی سریسیت و کانی‌های کربناتی جانشین شده‌اند. این نوع دگرسانی بیشتر واحدهای توف و داسیت را تحت تاثیر قرار داده است.

کانه زایی

بر اساس برداشت‌های صحرایی و بررسی مغزه‌های حفاری، کانه‌سازی در دایک‌های آپلیتی - گرانوفیری لوکوکرات انجام شده است. این دایک‌ها در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن نفوذ کرده‌اند. بنابراین، منطقه‌های فروشست (شسته شده)، برون‌زاد (سوپرژن) و درون‌زاد (هیپوژن) در منطقه ماهور در سنگ‌های دیواره‌ی آتشفشانی قابل تشخیص است (شکل ۲). منطقه‌ی فروشست در کانسار چندفلزی ماهور در اثر اکسایش و فروشست کانسنگ‌های سولفیدی به وجود آمده است. عناصر مس و روی به دلیل محلول بودن از بخش بالایی و اکسیدی شسته شده، و در نتیجه باعث تهی شدن این منطقه از این

کلریتی شده‌اند. سنگ‌های داسیتی دارای بافت پورفیری و حاوی بلورهای پلاژیوکلاز (۴۰ تا ۵۰ درصد)، کوارتز (۳۰ تا ۴۰ درصد) و فلدسپات قلیایی (۵ تا ۱۰ درصد) هستند. پلاژیوکلاز و فلدسپات قلیایی به صورت شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شوند. کانی کوارتز به صورت اولیه در این سنگ‌ها حضور دارد و در بعضی نقاط به شکل خلیجی دیده می‌شود که نشانگر عدم تعادل کانی با اندازه‌ی تشکیل دهنده‌ی سنگ است. پلاژیوکلازهای موجود در سنگ‌های داسیتی منطقه‌ی ماهور از ۳۰ تا بیش از ۶۰ درصد به سریسیت، کانی‌های رسی و کربنات و فلدسپات‌های قلیایی نیز تا ۳۰ درصد به کانی‌های رسی تجزیه شده‌اند. سنگ‌های آذرآواری موجود در منطقه از نوع توف با ترکیب داسیتی تا ریولیتی با بافت پورفیری و برشی و در نمونه‌ی دستی سفیدرنگ‌اند. بلورهای کوارتز (۲۰ تا ۴۰ درصد)، فلدسپات قلیایی (۲۰ تا ۳۰ درصد) و پلاژیوکلاز (۴۰ درصد) از کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها هستند. فلدسپات‌های قلیایی به صورت درشت بلور و نیز ریز بلور از ۱۰ تا ۳۰ درصد به کانی‌های رسی و بلورهای پلاژیوکلاز نیز بیش از ۴۰ درصد به سریسیت تجزیه شده‌اند. در میان سنگ‌های مورد بررسی شیشه‌هایی با بافت پرلیتی مشاهده می‌شوند که در اثر سردشدگی بسیار سریع گدازه‌های آبگون در فشار جو، آب یا سنگ‌های مجاور کاملاً سرد بوجود می‌آیند [۴]. در گستره اطراف کانسار دایک‌ها و توده‌های کوچک با ترکیب گرانیتی به فراوانی رخنمون دارند. بافت این سنگ‌ها آپلیتی و پورفیری است. به نظر می‌رسد که این دایک‌ها بخش نیمه‌عمیق یک توده‌ی نفوذی بوده که به دلایل ریخت‌شناختی از دید پنهان مانده است. دایکی که کانسار ماهور در آن تشکیل شده به همین نوع از سنگ‌ها وابسته است. این دایک در رده‌بندی IUGS [۵] یک گرانیت فلدسپات قلیایی نام می‌گیرد که دارای بافت آپلیتی و گاه گرانوفیری بوده و لوکوکرات است. این سنگ در اصل از ارتوز ($An_{0.1}; Ab_{4.3}; Or_{94.8}$) و آلبیت ($An_{1.8}; Ab_{96.9}; Or_{1.4}$) تشکیل شده و کانی‌های فلزی به فراوانی در بعضی نمونه‌ها پراکنده‌اند.

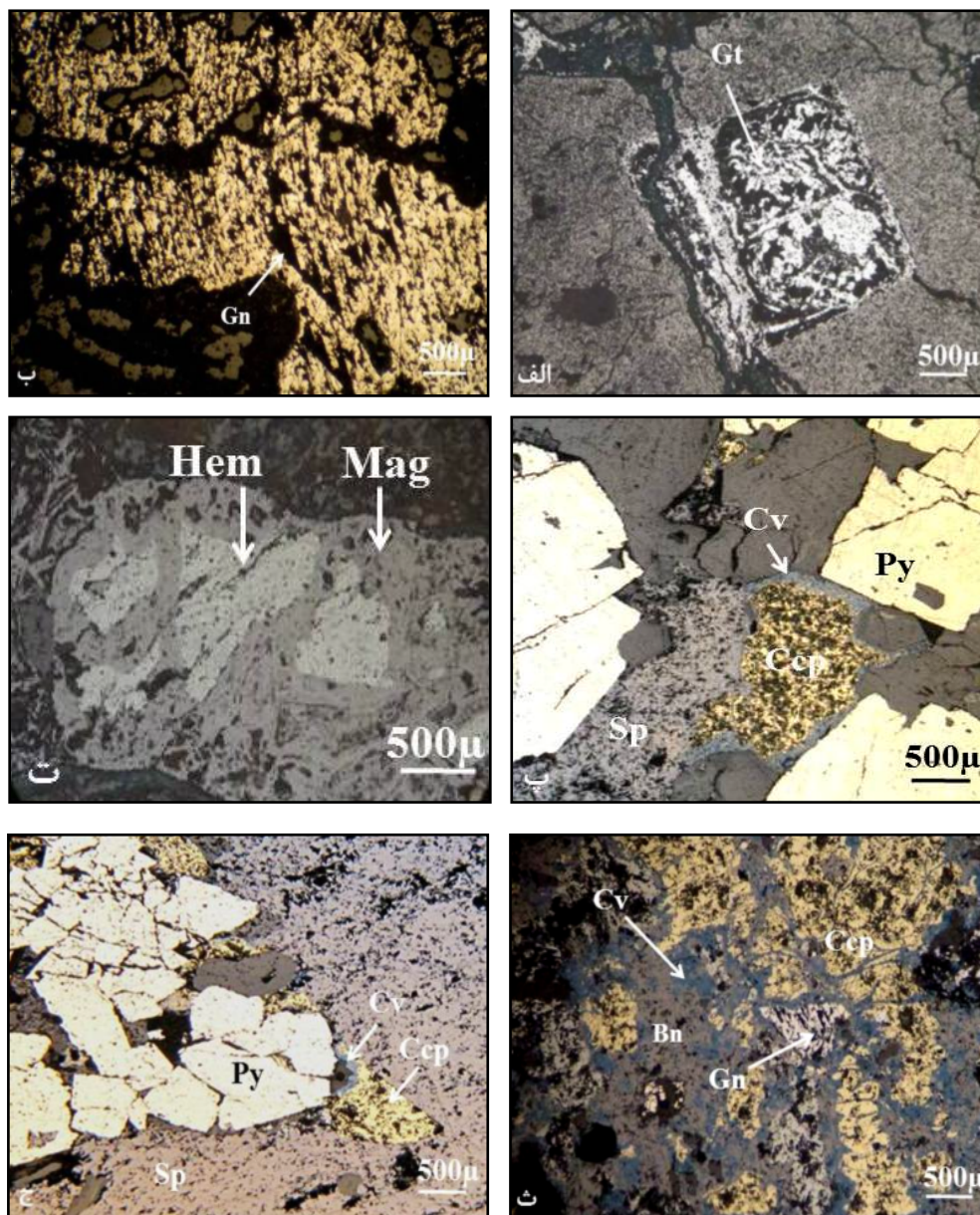
پدیده‌های دگرسانی که خود بخشی از سیستم کانی‌سازی محسوب می‌شوند در حجمی بسیار گسترده‌تر از مناطق کانی‌سازی تجلی می‌یابند و بررسی آن‌ها کمک شایانی به شناسایی انواع واحدهای امید بخش می‌کند. سنگ‌های ناحیه‌ی مورد بررسی تحت تاثیر دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی و

در این منطقه کالکوسیت و کولیت به صورت حاشیه‌ای، قشری و در طول شکستگی‌ها جانشین کالکوپیریت شده است. کانی‌های موجود در منطقه درون‌زاد یا هیپوژن شامل مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت است. کالکوپیریت به صورت یک کانی باقی‌مانده در منطقه‌ی درون‌زاد یا هیپوژن مشاهده می‌شود، این کانی‌ها به صورت یک حلقه واکنشی اطراف کالکوپیریت قرار می‌گیرند و از حاشیه در حال خوردن کالکوپیریت هستند (شکل ۳پ، ث). مگنتیت در مقاطع مورد بررسی از درصد پایینی برخوردار است و اغلب تحت تاثیر اکسایش به هماتیت تبدیل شده است. (شکل ۳ت). کانی اسفالریت به صورت توده‌ای تا ریزدانه، رشته‌ای و متراکم اغلب به همراه گالن مشاهده می‌شود (شکل ۳ج). شواهد میکروسکوپی منجمله کشیدگی رخ‌های مثلث گالن در یک جهت (شکل ۳ب) و شکستگی‌های موجود در برخی از نمونه‌های پیریت حاکی از تنش‌های زمین‌ساختی پس از کانه‌زایی است.

عناصر شده‌اند. عملکرد آب‌های جوی و حضور کربنات که ممکن است حتی در آب‌های جوی به صورت محلول نیز موجود باشند شرایط برای ایجاد کربنات‌های آبدار مس مانند مالاکیت و آزوریت را در این منطقه فراهم کرده است. این کانی‌ها به همراه هیدروکسیدهای آهن در بخش سطحی و در داخل شکستگی‌ها ایجاد شده‌اند. از هیدروکسیدهای آهن موجود در این منطقه می‌توان به گوتیت اشاره کرد. گوتیت یک هیدروکسید آهن است که از آب‌گیری اکسیدهای آهن مانند هماتیت و مگنتیت ایجاد می‌شود. این کانی به همراه اکسیدها و هیدروکسیدهای دیگر آهن جانشین کانی‌هایی مانند پیریت شده است. جانشینی گوتیت به جای پیریت مبین محیط گرمابی است (شکل ۳الف). گوتیت معمولاً اولین کانی دارای آهن فریک است که طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی آهن تشکیل می‌شود [۶]. وجود منطقه فروشست، راهنمای مشخصی را به سمت کانسنگ پدید آورده است. منطقه‌ی برون-زاد یا سوپرژن بیشتر شامل بورنیت، کولیت و کالکوسیت است.

| Decreasing age → | | | |
|---------------------|------------|------------|------------|
| Stage | Hypogene | Supergene | Leaching |
| Minerals | | | |
| Pyrite | ██████████ | | |
| Chalcopyrite | ██████████ | | |
| Galena | ██████████ | | |
| Sphalerite | ██████████ | | |
| Magnetite | ██████████ | | |
| Covellite | | ██████████ | |
| Bornite | | ██████████ | |
| Chalcocite | | ██████████ | |
| Hematite | | | ██████████ |
| Goethite | | | ██████████ |
| Limonite | | | ██████████ |
| Azurite | | | ██████████ |
| Malachite | | | ██████████ |
| Quartz | ██████████ | | |
| Calcite | ██████████ | | |

شکل ۲ دنباله‌ی پاراژنزی کانسار چندفلزی ماهور.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سولفیدی موجود در منطقه، الف: تبدیل شدن پیریت به گوتیت (Gt) (PPL)، ب: سمتگیری و کشیدگی رخ‌های گالن (Gn) در اثر عملکرد نیروهایی است که پس از تشکیل بر آن وارد شده است (PPL)، پ: تبدیل کالکوپیریت به کوولیت و پیریت‌های شکل‌دار ت: تبدیل مگنتیت (Mag) به هماتیت (Hem) (PPL)، ث و ج: کانی‌سازی سولفیدی در کانسار، که شامل کالکوپیریت (Ccp)، پیریت (Py)، گالن (Gn)، اسفالریت (Sp)، بورنیت (Bn)، کوولیت (Cv) است. کانی بورنیت و کوولیت به صورت حلقه واکنشی اطراف کالکوپیریت را فرا گرفته‌اند (PPL). علائم اختصاری نام کانی‌ها از [۷] اقتباس شده‌اند.

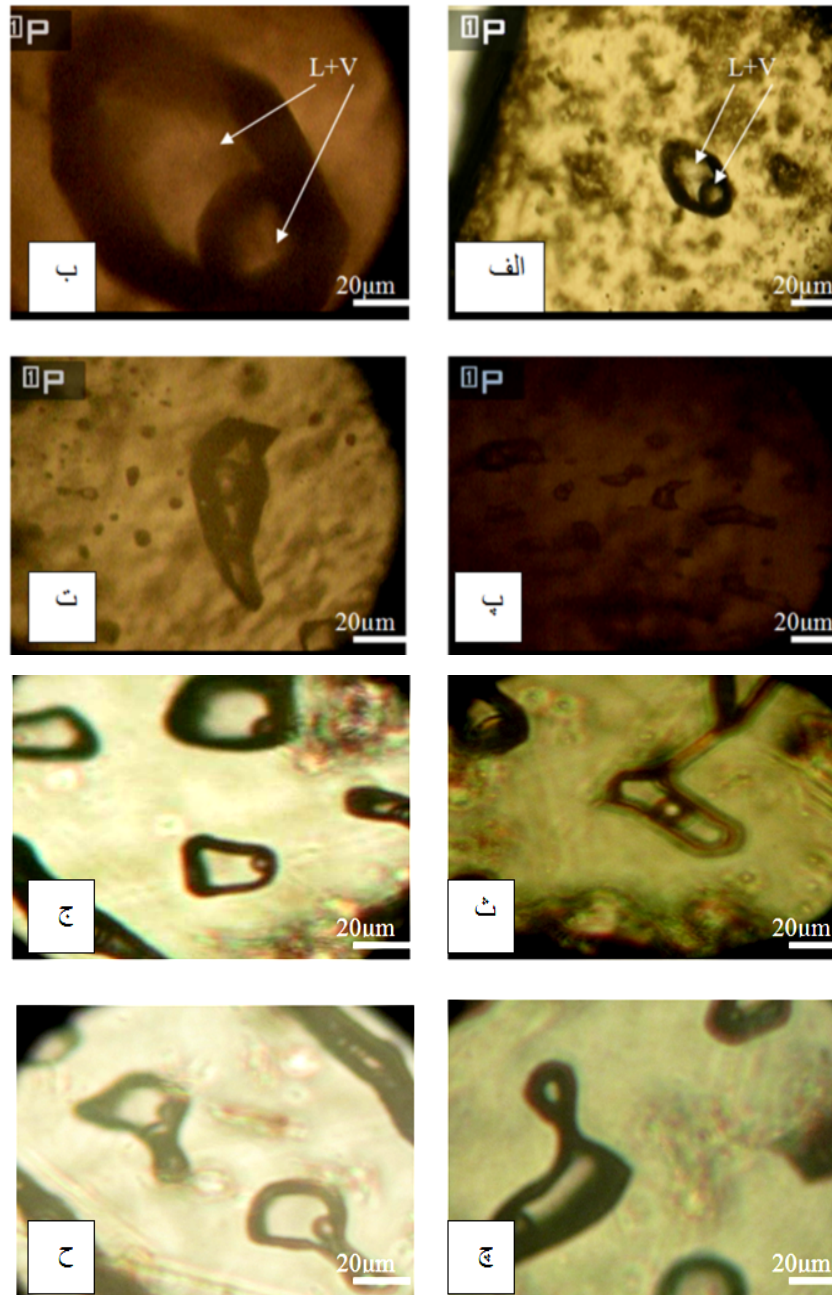
بررسی شاره‌های درگیر

یکی از راه‌های بررسی خاستگاه و دمای کانه‌زایی، بررسی شاره‌های درگیر است [۸]. فرآیند کانی‌سازی با عواملی از قبیل دما، فشار، pH و عملکرد آب‌های جوی کنترل می‌شود [۹]. به‌منظور تعیین ویژگی‌های شاره‌ی کانه‌ساز، آزمایش‌های ریزدماسنجی روی شاره‌های درگیر موجود در کانی اسفالریت

انجام گرفت. اغلب این میانبارها دارای شکل‌های زاویه‌دار، بیضوی، استوانه‌ای، دوکی (شکل ۴) و بی‌شکل هستند. فعالیت‌های زمین‌ساختی پس از تشکیل شاره‌های درگیر اولیه موجب تشکیل حجم زیادی از شاره‌های درگیر ثانویه در ابعاد نسبتاً بزرگ (۱۰-۷۰ میکرون) در منطقه شده است (شکل ۴پ). شاره‌های درگیر اولیه که با فاصله از یکدیگر قرار دارند نسبتاً

مقایسه با میانبار اولیه خواهد شد (شکل ۴ ح، چ). این پدیده در اثر انقباض ناشی از سرد شدن بلورها و یا هنگام رشد بلور رخ داده‌است. بنابر تقسیم‌بندی‌های انجام شده [۱۱، ۱۰] شاره‌های درگیر اولیه و ثانویه کاذب در تمامی نمونه‌ها دارای دو فاز ترکیبی آبگون و بخار ($L + V$) هستند و فاز جامد در آنها وجود ندارد.

بزرگ بوده و بیشتر شکل دارند (شکل ۴ الف، ب، ج). شاره‌های درگیر ثانویه و ثانویه کاذب (شکل ۴ ت) که با فاصله کم از یکدیگر قرار دارند سطوح بلوری کانی اسفالریت را قطع کرده‌اند. پدیده گردن یافتگی نیز در شاره‌های درگیر بررسی شده مشاهده شد. تشخیص این پدیده به این دلیل مهم است که تقسیم شدن شاره‌های درگیر بزرگ و تبدیل آن به شاره‌های درگیر کوچک، موجب تغییر ترکیب تک‌تک این میانبارها در



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از میانبارهای شاره‌ی موجود در کانی اسفالریت منطقه مورد بررسی، الف و ب و ج: میانبارهای شاره‌ی اولیه با اشکال هندسی منظم (مثلثی و هشت گوش) ت: شاره‌های درگیر ثانویه کاذب پ: میانبارهای شاره‌ی ثانویه ث: میانبارهای شاره‌ی دوکی شکل چ و ح: پدیده‌ی گردن یافتگی در شاره‌های درگیر (L: مایع، V: بخار).

فاز نسبتاً همگن را تشکیل می‌دهد، که به راحتی قابل شناسایی نیست.

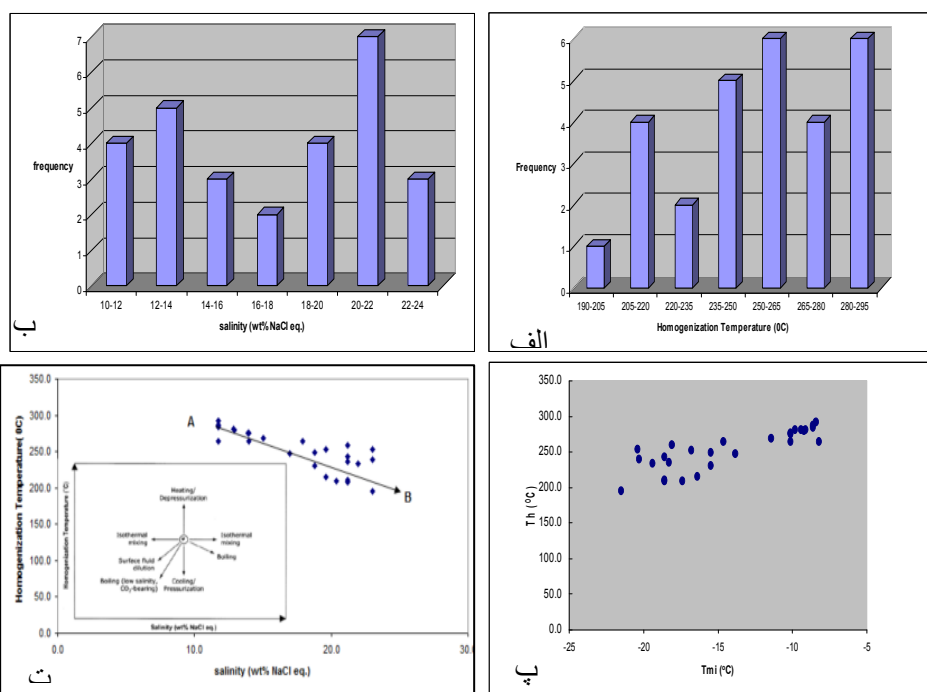
از آنجا که شاره‌های درگیر ثانویه کاذب، ترکیب شیمیایی و دماسنجی مشابه شاره‌های درگیر اولیه از خود نشان می‌دهند [۱۴]، بررسی دمای همگن‌سازی و شوری کانسار چندفلزی ماهور بر اساس بررسی این دو نوع شاره‌ی درگیر انجام پذیرفت. بر اساس بررسی شاره‌های درگیر اولیه و ثانویه کاذب دمای یوتکتیک شاره‌های درگیر از 32°C تا 59°C متغیر بوده و دمای ذوب آخرین قطعه یخ ثبت شده (T_{mi}) 8°C تا 20°C است. با توجه به شوری محاسبه شده با رابطه‌ی [۱۱]، درصد نمک طعام بین ۱۱٫۷ تا ۲۳ و به طور متوسط ۱۷ درصدوزنی معادل NaCl به دست آمد.

در نمونه‌های بررسی شده، دمای همگن‌سازی شاره‌های درگیر دو فازی با تبدیل بخار به مایع صورت گرفته است. دمای همگن شدن نمونه‌ها از ۱۹۴ تا ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و متوسط دمای همگن شدن ۲۵۳ درجه سانتی‌گراد است. نمودار شوری-دمای همگن شدن دامنه‌ی تغییرات را در راستای یک روند خطی نشان می‌دهد که با توجه به نمودار (شکل ۵ ت) بیانگر رخداد پدیده‌ی جوشش در شاره‌ی مورد بررسی است [۱۵].

شاره‌های درگیر ثانویه در نمونه‌های مورد بررسی دو نوع-اند؛ نوع تک فاز، با فاز آبگون و دو فازی با فاز آبگون و گاز، که تعداد نوع دوم بسیار کم و محدود است. شاره‌های ثانویه در راستای شکستگی‌ها بوده، و تقریباً ۹۰٪ آنها از فاز آبگون تشکیل شده است. بررسی‌های شاره‌های درگیر ثانویه حاکی از این است که بیشتر این شاره‌ها ابعادی متوسط بین ۱۰ تا ۵۰ میکرون دارند.

دماسنجی شاره‌های درگیر

با اندازه‌گیری دمای انجماد می‌توان نمک‌سانی را در شاره‌های درگیر اندازه‌گیری و نیز چگالی و کیفیت املاح موجود را مشخص کرد. نقطه‌ی یوتکتیک برای سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ تقریباً برابر با $20/8$ - درجه‌ی سانتی‌گراد است. نقطه یوتکتیک در تمامی شاره‌های درگیر اعم از اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب پایین‌تر از این مقدار است ($-30 <$ درجه سانتی‌گراد) بنابراین حضور نمک‌های دیگر علاوه بر NaCl نظیر سیستم‌های چند همنه‌ای $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{MgCl}_2$ در شاره‌ی کانه‌ساز محتمل است [۱۲، ۱۳]. با توجه به دمای یوتکتیک بدست آمده، امکان حضور اندک CO_2 در برخی از نمونه‌ها وجود دارد. به دلیل کم بودن میزان، CO_2 این ترکیب به همراه H_2O یک



شکل ۵ الف) نمودار ستونی دمای همگن‌شدگی شاره‌های درگیر نسبت به فراوانی آن‌ها که بیشترین فراوانی مربوط به گستره‌های دمایی ۲۸۰ تا ۲۹۵ و ۲۵۰ تا ۲۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. ب) نمودار ستونی شوری شاره‌های درگیر نسبت به فراوانی آن‌ها که بیشترین فراوانی در گستره ۲۰-۲۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است. پ) نمودار دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mi}) در برابر دمای همگن‌شدگی (Th) که بیانگر سرد شدگی و رقیق‌شدگی شاره است. ت) نمودار همگن‌شدن-شوری که بیانگر رخداد جوشش در کانسار مورد بررسی است.

تشکیل طلا به صورت دانه‌های آزاد شود. ارتباط میان کانی-سازی نقره و فلزات پایه‌ی محلول‌هایی با شوری بالاتر و کانی‌سازی طلا و نقره با محلول‌هایی با شوری پایین‌تر، قبلاً نیز پیشنهاد شده است [۱۶]. با توجه به دمای همگن‌شدگی محلول و شوری آن، چگالی متوسط بین ۰/۸۵ تا ۱/۰۵ بدست آمد. همچنین با استفاده از نمودار هاس [۱۷]، (شکل ۶) و دمای به دست آمده از نتایج ریزدماسنجی، عمق به دام افتادن شاره بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر (فشار معادل ۸۰ تا ۱۲۰ بار) به دست آمد.

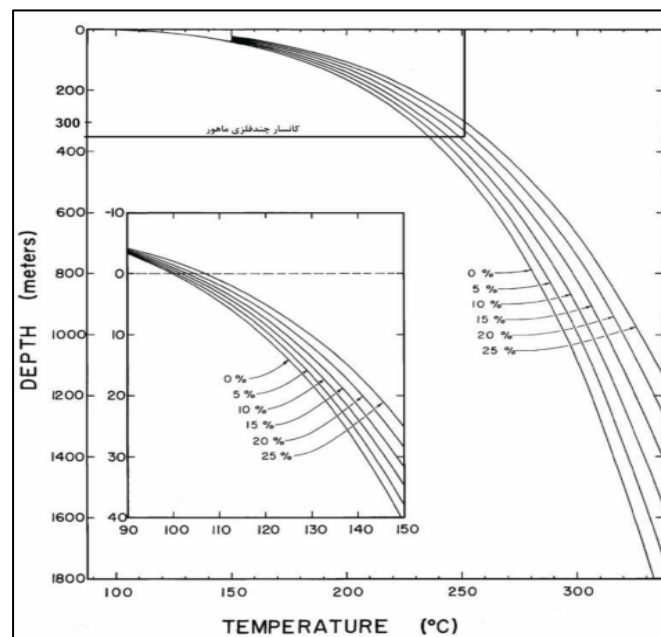
مدل و عوامل موثر بر تشکیل کانسار

به منظور تعیین مدل کانسار، ویژگی‌های کانسار ماهور با انواع کانسارهای اپی‌ترمال [دما پایین] و مزوترمال [میان‌گرمایی] مقایسه شدند. کانسارهای نوع اپی‌ترمال معمولاً در نزدیکی سطح زمین و در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه‌شکل می‌گیرند [۱۸]. ولی در مواردی بر اساس بررسی‌های شاره‌های درگیر، دمایی بیشتر از آن نیز گزارش شده است [۱۰]. سرد‌شدگی و میل به رقیق شدن از پدیده‌های معمول در کانسارهای اپی-ترمال است. احتمالاً در این سیستم‌ها تکامل پسرونده حاکم است که در آن فاز اولیه‌ی دمای بالا با گذشت زمان و پیشرفت واکنش‌ها و رقیق‌شدگی نیز بر اثر نفوذ آب‌های فرورو بالا رفته و دما کاهش می‌یابد [۱۹].

شاره‌های درگیر ثانویه نیز مورد آزمایش گرمایشی و سرمایشی قرار گرفتند. دمای همگن شدن در شاره‌های درگیر ثانویه بین ۱۰۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد است. شاره‌های درگیر ثانویه دمای همگن‌شدگی و شوری بسیار پایین‌تر از انواع دیگر شاره‌های درگیر در نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند (کمتر از ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام). وجود اختلاف دمای مشخص بین دو نسل از شاره‌ها (نوع اولیه و ثانویه)، حاکی از دو فاز مستقل دمایی در پیدایش آن‌ها بوده است. دما و شوری پایین این شاره‌ها بیانگر تشکیل آن‌ها از یک محلول با دمای پایین و درصد شوری کم است. نمودار ستونی دمای همگن‌سازی نسبت به فراوانی مربوط به شاره‌های درگیر اولیه و ثانویه کاذب (شکل ۵ الف) نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی مربوط به گستره‌ی دمایی ۲۵۰ تا ۲۶۵، ۲۸۰ تا ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به دمای همگن‌شدگی شاره و شوری بدست آمده، چگالی متوسط بین ۰/۸۵ تا ۱/۰۵ محاسبه می‌شود.

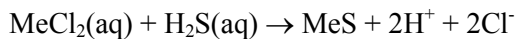
بحث

میانگین میزان شوری در کانسار چندفلزی (مس، سرب و روی) ماهور ۱۷ درصد وزنی معادل NaCl است. بنابر این شوری محلول‌های گرمایی منطقه‌ی ماهور نسبتاً بالاست، و باعث کانی‌سازی فلزات پایه و نقره در این منطقه شده و حضور همبافت‌های طلادار در این منطقه به حدی نبوده که باعث



شکل ۶ عمق به دام افتادن شاره‌های درگیر در کانسار ماهور در عمق ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر بر اساس نمودار هاس [۱۷].

شاره با فلدسپارها و تبدیل آن به سریسیت که نتیجه‌ی آن آزاد کردن فلزات قلیایی و قلیایی خاکی به درون شاره‌ها از طریق مصرف H^+ می‌شود. ۲- در اثررقیق شدن با آب‌های جوی و اضافه شدن Ca^{2+} به شاره که Ca^{2+} با Cl واکنش داده و با پیشرفت واکنش زیر به سمت راست، سولفیدهای فلزی ته‌نشین می‌شوند.



عواملی مانند جوشش و کاهش دما باعث ته‌نشینی فلزات از همبافت‌های بی سولفیدی می‌شوند [۲۴].



جوشش و آمیختگی دو عامل مهم ته‌نشینی فلزات در سیستم‌های اپی‌ترمال است [۲۵]. با در نظر گرفتن، دنباله‌ی پاراژنری کانی‌سازی و تغییرات سیستماتیک دمای همگن‌شدگی (Th) و دمای ذوب یخ (Tmi) در منطقه‌ی ماهور، روند رقیق‌شدگی برای محلول به ثبت می‌رسد که دلالت بر آمیختگی یک محلول داغ و شور با یک محلول رقیق‌تر و سردتر دارد (شکل ۵ ج). احتمالاً محلول داغ با شوری بالاتر خاستگاه ماگمایی و محلول سردتر، خاستگاه جوی دارند [۲۶]. محلول شور و غنی از فلزهای پایه، توان تشکیل دانه‌های آزاد طلا را نداشته و تنها سبب تشکیل فلزات پایه در این منطقه شده است. با توجه به شواهد بدست آمده پدیده جوشش، رقیق‌شدگی و سردشدگی محلول کانه ساز عوامل مهم در ته‌نشینی مواد معدنی در این کانسار به شمار می‌آیند. در ادامه برخی از ویژگی‌های کانسار چندفلزی ماهور با چند کانسار اپی‌ترمال ایران و جهان در جدول ۱ مقایسه شده‌اند.

کانسارهای مزوترمال [میان‌گرمایی] در اعماق بیشتر نسبت به کانسارهای اپی‌ترمال (بیش از ۱۲۰۰ متر) و دمای بیشتر شکل می‌گیرند. این نوع از کانسارها معمولاً در نزدیکی توده‌های آذرین نفوذی رخ می‌دهند و گاهی ممکن است با پدیده‌های زمین‌ساختی ناحیه‌ای همراه باشند. کانسارسازی به صورت جاننشینی و یا به صورت پر کردن فضاهای خالی در این کانسارها معمول است. این کانسارها فاقد کانی‌های با دمای بالا و حاوی آلپیت، کوارتز، سریسیت، کلریت، کربنات‌ها، اپیدوت و مونتمریلونیت هستند. حضور پیریت‌های ریز دانه در این کانسارها رایج است [۲۰].

بر اساس نتایج بدست آمده از بررسی شاره‌های درگیر (از قبیل دمای همگن‌شدگی و شوری شاره‌ی کانه ساز و عمق تشکیل کانسار) و با در نظر گرفتن تمام شواهد صحرایی و آزمایشگاهی شامل ترکیب سنگ میزبان (کانه‌سازی درون سنگ میزبان آتشفشانی)، بافت و ساخت کانه (از قبیل بافت‌های جاننشینی و پر نمودن فضاهای خالی)، منطقه‌های دگرسانی سریسیتی، سیلیسی و پروپیلیتی، عناصر فلزی اصلی همانند مس، سرب، روی و عدم حضور کانی‌های با دمای بالا مانند گارنت، تورمالین، توپاز و غیره، کانسار چندفلزی ماهور در رده‌ی کانسارهای اپی‌ترمال نوع رگه‌ای تا مزوترمال [میان‌گرمایی] قرار می‌گیرد (جدول ۱).

در سیستم‌های اپی‌ترمال، نقره و فلزات پایه به وسیله‌ی همبافت‌های کلروری [۲۲، ۲۱] و طلا توسط همبافت بی-سولفیدی طلا $(HS)_2$ حمل می‌شوند [۲۳]. عواملی که سبب بی‌ثباتی همبافت‌های کلروری و ته‌نشینی فلزات پایه و نقره می‌شود شامل موارد زیرند: ۱- افزایش pH که در اثر واکنش

جدول ۱ مقایسه‌ی برخی از ویژگی‌های کانسار چندفلزی ماهور با کانسارهای اپی‌ترمال در ایران و جهان.

| ویژگی‌ها | کانسار چندفلزی ماهور | کانسار قلعه زری | کانسار فرزینلو مکزیک | وا ای هی نیوزلند |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|--|---|
| سنگ میزبان | آپلیت گرانیتی و گرانوفیر | آندزیت بازالت و توف‌های آندزیتی | آندزیت | آندزیت |
| سن (میلیون سال) | اوسن؟ | ترشیاری | الیگوسن (۲۸-۳۳) | ترشیاری |
| کانی‌شناسی | کالکوپیریت، پیریت، گالن، اسفالریت | کالکوپیریت، پیریت، گالن، اسفالریت، اسپیکیولاریت، سولفو سالت طلا | پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، سولفوسالت نقره، کوارتز، کلسیت | طلا، آکانتیت، پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت |
| دمای همگن شدن (درجه سانتی‌گراد) | ۱۹۴-۲۹۲ | ۱۶۵-۳۳۰ | ۱۷۳-۲۶۵ | ۱۸۸-۳۰۶ |
| شوری (درصد وزنی معادل نمک طعام) | ۱۱٫۷-۲۳ | ۰٫۹-۵ | ۰٫۱-۱۲ | ۰٫۲-۱٫۷ |
| منبع | این نوشتار | [۲۷] | [۱۵] | [۲۸] |

برداشت

سنگ‌های میزبان اصلی کانه سازی در منطقه عبارتند از: سنگ‌های اسیدی نیمه‌عمیق. این سنگ‌ها که دایک‌های تاخیری ماگمایی به نظر می‌رسند به طور قطع بخش هیپ آبیسال یک توده‌ی نفوذی هستند که به دلایل ریخت‌شناسی از دید پنهان مانده و کانه‌سازی در این سنگ‌ها در راستای یک رگه با روند تقریبی شمالی - جنوبی رخ داده است. کانه‌سازی در سه منطقه فروشت شامل کانی‌های (مالاکیت، آزوریت، هماتیت، گوتیت و لیمونیت) برون‌زاد یا سوپرژن (بورنیت، کولیت و کالکوسیت) و درون‌زاد یا هیپوژن (مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن، اسفالریت) تشکیل شده است. کانی‌های گانگ [هرزه] نیز بیشتر شامل کوارتز، کلسیت هستند. بافت‌های جانیشینی، شکافه پرکن و برشی از مهم‌ترین بافت‌های کانی‌سازی در منطقه به شمار می‌آیند. مهم‌ترین دگرسانی‌های شناسایی شده در منطقه شامل دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی هستند که در اطراف رگه در کل منطقه مشاهده می‌شوند ضمن آنکه دگرسانی پروپیلیتیک نیز در مقیاس کوچکتر به چشم می‌خورند.

بررسی‌های شاره‌های درگیر حاکی از کانه‌زایی در یک گستره‌ی دمائی ۱۹۰ تا ۲۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و عمق تقریبی کمتر از ۴۰۰ متر است. میانگین شوری شاره‌های درگیر به طور متوسط ۱۷ درصد وزنی معادل نمک طعام بدست آمده است. میزان شوری بالا در محلول‌های گرمایی ماهور سبب کانه‌سازی فلزات پایه شده است و حضور همبافت‌های طلادار به حدی نیست که دانه‌های طلای آزاد تشکیل شود. با توجه به شواهد یاد شده می‌توان چنین استنباط کرد که کانسار چندفلزی ماهور یک کانسار با نوع اپی‌ترمال تا مزوترمال [میان‌گرمایی] رگه‌ای بوده است. رخداد جوشش و به دنبال آن سردشدگی رقیق‌شدگی در اثر نفوذ آب‌های جوی عوامل مهم در تنه‌نشینی مواد معدنی در این کانسار به شمار می‌آیند.

مراجع

[1] Khoei Qorbani M., Tajbakhsh P., "Copper deposits in Iran", Geological Survey of Iran Press, (1999) 421 P.

[۲] آقا نباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳).

[۳] حسینی ض.، افشاریان زاده م.، چایچی ز.، "تقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ده سلم (چاه وک)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور (۱۳۷۱).

[۴] همام م.، "سنگ‌شناسی آذرین"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۸).

[5] Le Maitre R.w., "a classification of igneous rocks and glossary of terms", Blackwell oxford, (2002) 236 P.

[۶] غلامی ن.، کریم پور م.ح.، مظاهری ا.، "بررسی زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، و ژئوشیمی در منطقه شرق ارغش (جنوب غرب نیشابور) با نگرشی بر پی‌جویی مس پورفیری"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال نوزدهم، شماره ۱ (۱۳۹۰)، ص ۲۹-۴۴.

[7] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", American Mineralogists, 68 (1983) 277-279.

[8] Piranjo F., "Hydrothermal mineral deposits", Springer Verlag, (1992).

[9] Sorby H., "On the microscopic structure of crystals indicating the origin of minerals and rocks", Journal of Geological Society, London (1980).

[10] Roedder E., "Fluid inclusions" Reviews in Mineralogy 12, Mineralogical Society of America (1984) 646p.

[11] Shephard T.J., Rankin A.H., Alderton D.H., "A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies" Blackie and Sons (1985) 239p.

[12] Hall D.I., Sterner S.M., Bodnar R.J., "Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions", Economic Geology 93 (1988) 197-202.

[13] Robb L., "Introduction to ore forming processes", Blackwell publishing. British Library (2005).

[۱۴] کریم پور م.ح.، سعادت س.، "زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۱).

[15] Wilkinson J.J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits", Elsevier, Lithos 55 (2001) 229-272.

[16] Henley R.W., "The geological framework of epithermal deposits, In Berger. P. M.,(Ede),

- [23] Benning L.G., Seward T.M., "Hydrosulfide complexing of Au in hydrothermal solutions from 150 to 400 °C and 500 to 1500 bars", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (1996) 1849-1871.
- [۲۴] مهربانی ب.، قاسمی سیانی م.، "کانی شناسی و زمین شناسی اقتصادی کانسار پلی متال چشمه حافظ، استان سمنان، ایران"، *مجله زمین شناسی اقتصادی*، شماره ۱ (جلد ۲) (۱۳۸۹)، ص ۱-۲۰.
- [25] Giggenbach W.F., "The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems", in Barneš, H.L., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd ed., New York, Wiley Interscience, (1997) 737-796.
- [26] Camprubi A., Chomiak B.A., Canals A., Norman D.I., "Fluid sources for the La Guitarra epithermal deposit (Temascaltepec district, Mexico): Volatile and helium isotope analyses in fluid inclusions", *Chemical Geology*, 231 (2006) 252-284.
- [27] Hassan Nezhad A., Moore F., "A stable isotope and fluid inclusion study of the Qaleh-zari Cu-Au-Ag deposit, Khorasan Province, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2006) 805-818.
- [28] Bartwaite R.L., Simpson M.P., Faure K., "The Waihi epithermal gold-silver base metal sulfide-quartz vein system, New Zealand: temperature and salinity controls on electrum and sulfide deposition", *Economic Geology*, 97 (2002) 269-290.
- "Geology and geochemistry of epithermal system", *Economic Geology* (1986) 1-24.
- [17] Hass J.I., "The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure", *Econ. Geol.* 66 (1971) 940-946.
- [18] Hedenquist J.W., "Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific basin", In: Hom, M.K., Editor. *Transactions of the Fourth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference*, Amer. Assoc. Petrol. Geologists, Tulsa, OK, (1987) 513-524.
- [19] Rossetti P., Colombo F., "Adularia-sericite gold deposits of Marmato (Caldas, Colombia): field and petrographic data", In: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, I., Wilkinson, J.J., Editors. *Fractures, Fluid Flow and Mineralization* Geological Society of London, Special Publication vol.155. (1999).
- [۲۰] شهاب پور ج.، "زمین شناسی اقتصادی"، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۸۰)، ۵۴۳ صفحه.
- [21] Seward T.M., Barnes H.L., "Metal transport by hydrothermal ore fluids", in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York. John Wiley and Sons, (1977) 435-486.
- [22] Palyanaova G., "Physicochemistry modeling of the coupled behaviour of gold and silver in hydrothermal processes, gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implication.", *Chemical Geology*, 255 (2008) 399-413.