



رهیافتی بر شکل گیری کانسار مس ماهور، جنوب غرب نهبندان، بر پایه بررسی های کانی شناسی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ های گوگرد

علیرضا الماسی^{۱*}، روح الله میری بیدختی^۲، محمدحسن کریم پور^۲، سید احمد مظاهری^۲

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۹/۸/۱۴، نسخه نهایی: ۹۹/۱۰/۱۷)

چکیده: منطقه ماهور در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غرب نهبندان در استان خراسان جنوبی در بخش مرکزی کمربند آتشفشانی-ماگمایی قطعه لوت واقع است. نفوذ یک توده گرانیتوئیدی با ترکیب دیوریت، کوارتز دیوریت، کوارتز مونزو دیوریت و کوارتز مونزیتی با سن الیگوسن به درون سنگ های آتشفشانی منطقه با سن پالئوسن-اوسن منجر به دگرسانی و کانی سازی شده است. پهنه های دگرسانی منطقه شامل آرژیلی (کانی های رسی)، پروپلیتی (کلریت، سربیسیت، کلسیت و اپیدوت)، فیلی (کوارتز، سربیسیت و پیریت) و سیلیسی هستند. رخداد کانی سازی به صورت افشان و رگچه ای بوده و شامل پیریت، مگنتیت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، آرسنوپیریت، کوبانیت، کوولیت، تتراهدريت، جیمسونیت و استینیت است. بر اساس روابط قطع شدگی بین رگچه ها، دو نوع رگچه کوارتز + اسفالریت + پیریت ± کالکوپیریت (رگچه های نوع ۱) و کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± اسفالریت (رگچه های نوع ۲) در بخش های عمقی منطقه شناسایی شده است. سیال های درگیر در رگچه های نوع ۱ و ۲ به ترتیب دارای شوری ۶/۸ تا ۲۱/۲ و ۷/۹ تا ۲۰/۲ درصد وزنی NaCl و دمای همگن شدگی ۳۱۵ تا ۵۷۵ و ۱۷۷ تا ۴۵۴ درجه سانتیگراد هستند. یافته های ریزدماسنجی بیانگر دگرگونی سیال کانه ساز طی رخدادهای جوشش و آمیختگی سیال های ماگمایی با آب های جوی است. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ پیریت و کالکوپیریت ۳/۱۵- ۱/۸ در هزار بیانگر خاستگاه ماگمایی گوگرد است. نتایج بررسی های زمین شناسی، دگرسانی، کانی سازی، سیال های درگیر و ایزوتوپ های پایدار گوپای رخداد کانی سازی سامانه پورفیری در منطقه ماهور است.

واژه های کلیدی: کانی شناسی؛ دگرسانی؛ میانبارهای سیال؛ ایزوتوپ های گوگرد؛ ماهور؛ قطعه لوت.

مقدمه

قلع هستند. از توده های نفوذی وابسته به کرتاسه می توان به کازو، بزمان و بجستان اشاره کرد. کازو و بجستان از گرانیتوئیدهای نوع I هستند و همراه آن ها کانی سازی پورفیری مس صورت گرفته است. اواسط ائوسن تا اوایل الیگوسن را می توان دوره مهمی برای فعالیت ماگمایی و کانی سازی قطعه لوت در نظر گرفت. دیوریت، مونزونیت و گرانودیوریت در بخش های مختلفی از قطعه لوت از جمله ماهرآباد، خوپیک، هیرد، آغل کوه، کجه، نجم آباد، فردوس، ده سلم، چاه شلمجی و قلعه زری گزارش شده اند. این توده های گرانیتوئیدی وابسته به سری های

رخداد فعالیت های ماگمایی ترشیری متنوع از نظر ماهیت زمین شیمیایی، قطعه لوت را به یکی از مستعدترین پهنه های ساختاری ایران برای کانی سازی های فلزی و غیرفلزی تبدیل کرده است. فعالیت ماگمایی قطعه لوت از اواخر ژوراسیک تا کواترنری منجر به گسترش انواعی از سنگ های آتشفشانی، آذر آواری، نیمه آتشفشانی و نفوذی شده است [۱]. توده های گرانیتوئیدی سرخ کوه، شاه کوه و کلاته آهنی به سن ژوراسیک وابسته به سری های ایلمنیتی نوع S بوده و مستعد کانی زایی

مگنتیتی نوع I هستند. توده‌های نفوذی ماهرآباد، خویک، ده سلم و چاه شلجمی به ویژه از نظر کانی‌زایی مس-طلا پورفیری اهمیت دارند [۲]. مرزهای شرقی و غربی قطعه لوت توسط گسل‌های نه‌بندان و نایبند و مرز شمالی آن با گسل درونه محدود شده‌اند. در این قطعه، حجم سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک و نهشته‌های قاره‌ای نئوژن بیشتر از توده‌های نفوذی مزوزوئیک و سنوزوئیک است [۳]. کانسار چندفلزی ماهور در گستره طول‌های $51^{\circ}58'08''$ تا $58^{\circ}56'08''$ شرقی و عرض-های جغرافیایی $31^{\circ}06'00''$ تا $31^{\circ}12'50''$ شمالی در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غرب نه‌بندان و ۴۵ کیلومتری غرب روستای ده سلم در استان خراسان جنوبی واقع است. راه دسترسی به منطقه از طریق جاده نه‌بندان-شهداد است. تاکنون پژوهش‌های بسیاری پیرامون سنگ‌های آذرین منطقه معدنی ماهور و کانی‌سازی‌های آن انجام شده است. [۴] بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و دگرسانی، کانسار چندفلزی ماهور را در رده کانسارهای فراگرمایی نوع رگه‌ای تا متوسط‌دما قرار داده‌اند. بر اساس بررسی‌های اسفرم [۵]، این کانسار دارای ماهیت فراگرمایی است. همچنین به باور اسفرم و همکاران [۶]، سنگ‌های آتشفشانی برونزد یافته در گستره این کانسار دارای ماهیت آهکی-قلیایی پتاسیم بالا هستند و ویژگی‌های سنگ-های آتشفشانی نواحی فرورانش و قوس‌های آتشفشانی را نشان می‌دهند. بررسی‌های بومری و همکاران [۷] گویای تمرکز بالای نقره در کانی‌های سولفیدی این کانسار است. بررسی‌های زمین‌فیزیکی به روش قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی (IP/RS) نشان داد که بیشترین ناهنجاری‌های فلزی در منطقه ماهور همراه با دگرسانی‌های کوارتز-سریسیت-پیریت، سیلیسی، و کلریت است [۸]. بر اساس سن-سنجی به روش U-Pb بر کانی زیرکن، توده دیوریتی همراه با کانسار ماهور با سن 31.88 ± 2 میلیون سال وابسته به دوره الیگوسن است [۹]. بر پایه نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd، توده گرانیتوئیدی ماهور طی جایگیری در سطوح کم عمق شواهدی از آلودگی توسط پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد [۹]. بررسی‌های یونسی و همکاران [۱۰] بیانگر این است که سنگ‌های آذرین ماهور دارای سرشت آهکی-قلیایی پتاسیم بالا تا شوشونیتی، از نوع I و متاآلومین هستند؛ همچنین گوشته سنگ‌کره‌ای عامل اصلی فعالیت‌های ماگمایی در ماهور است. بر پایه بررسی‌ها کانی-شناسی یونسی و همکاران [۱۱]، خاستگاه کانسار ماهور با

کانسارهای چندفلزی نوع کردیلرن قابل مقایسه است. هدف ما از این پژوهش تعیین نوع کانه‌ها، بافت و روابط همبری آن‌ها، تعیین مجموعه‌های دگرسانی منطقه، تحلیل تکامل سیال‌های گرمایی بر اساس بررسی سیال‌های درگیر و سرانجام، بررسی-های ایزوتوپی گوگرد برای تعیین منبع گوگرد موثر در کانه‌زایی بود.

روش بررسی

در این پژوهش پس از پیمایش‌های صحرایی و کنترل واحدهای سنگی برونزد یافته در منطقه مورد بررسی، از توده نفوذی نیمه‌عمیق، پهنه‌های دگرسان، رگه‌ها و بخش‌های کانه‌دار در سطح و عمق نمونه‌برداری شد. تعداد ۳۸ گمانه در کل به طول ۵۰۷۱ متر حفر و بررسی شدند. برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی، ۱۱۰ مقطع نازک از نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های آذرین منطقه و بخش‌های دگرسان سطحی و زیرسطحی تهیه شد. همچنین برای بررسی‌های همزمان کانی-شناسی و دگرسانی، تعداد ۳۰ مقطع نازک-صیقلی و ۲۷ قطعه صیقلی از نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های سطحی و گمانه‌های منطقه تهیه گردید. بررسی‌های سنگ‌نگاری میانبارهای سیال بر ۱۱ مقطع دوبر صیقل تهیه شده از کوارتز و اسفالریت انجام شد. دماسنجی ۱۴۰ میانبار سیال با میکروسکوپ مجهز به پلاتین سرمایی-گرمایی ساخت شرکت لینکام مدل TMH 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. گفتنی است که مقدار شوری برای ۱۱۰ میانبار اندازه‌گیری گردید. به منظور تعیین خاستگاه گوگرد، ۸ نمونه پیریت و کالکوپیریت پس از خردایش، دست چینی و رسیدن به خلوص ۹۸ درصد در آزمایشگاه Iso-Analytical شهر کرو انگلستان با طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی ترموفینیگان دلتاپلاس برای شناسایی ترکیب‌های ایزوتوپی گوگرد تجزیه شدند. نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد بر پایه استاندارد ترویلیت کانیون دیابلو (CDT) محاسبه شدند.

زمین‌شناسی منطقه

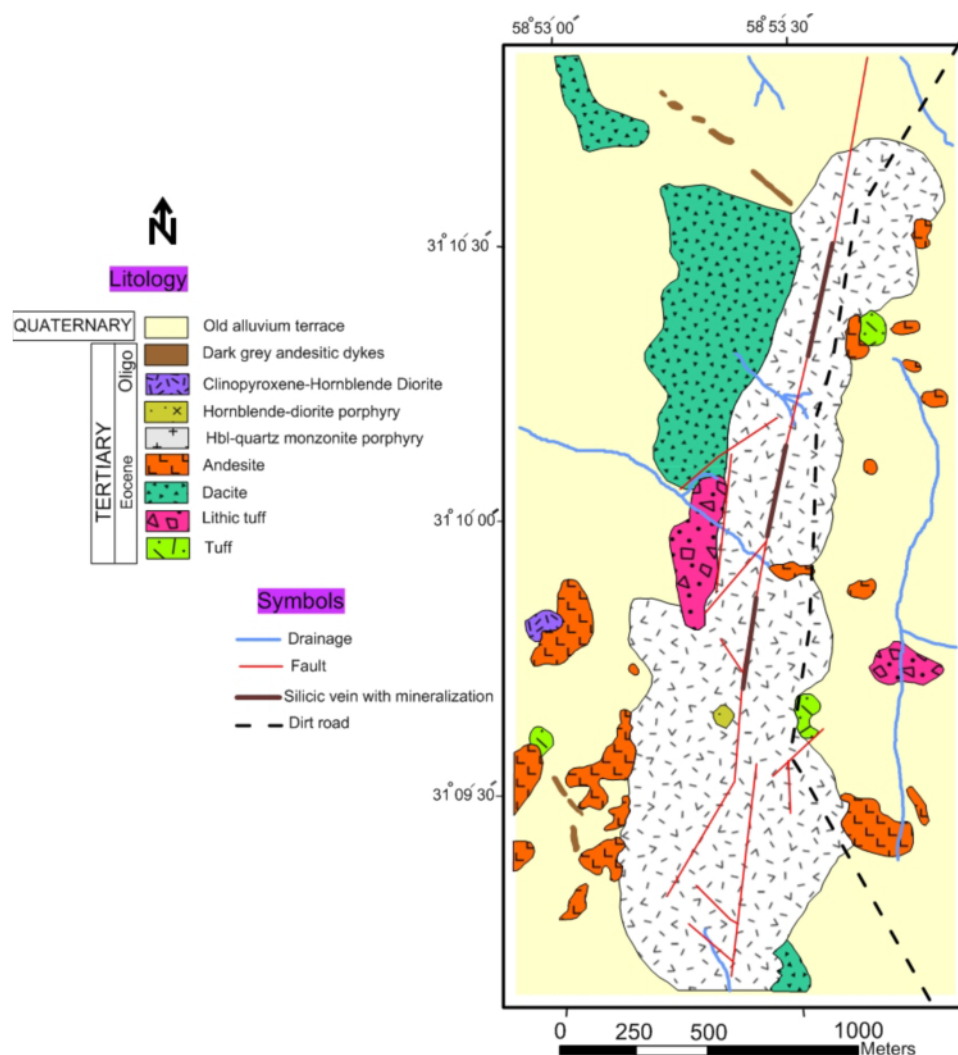
بر اساس نقشه ۱:۵۰۰۰ منطقه ماهور (شکل ۱)، واحدهای آذرین شناسایی شده در گستره مورد بررسی را می‌توان به دو بخش سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری پالئوسن-ائوسن و توده‌های نفوذی نیمه عمیق حدواسط تقسیم کرد.

سنگ‌های آتشفشانی آذرآواری پالئوسن-ائوسن در معرض توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق بوده‌اند. این واحدها مربوط

عمیق منطقه ماهور دیوریتی است که در غرب بخش کانی‌سازی شده دیده می‌شود و بر اساس روابط این سنگ‌شناسی با سایر واحدها، به نظر می‌رسد که جدیدترین واحد سنگی منطقه است و ارتباطی نیز با کانی‌سازی ندارد (شکل ۱). بر اساس بررسی‌های میری بیدخنی و همکاران [۹]، توده گرانیتوئیدی ماهور در گستره گرانیتوئیدهای نوع I یا S قرار دارد و از نظر زمین‌ساختی در موقعیت کمربندهای آتشفشانی پهنه فرورانش (VAG) واقع بوده و در کرانه‌های قاره‌ای فعال شکل گرفته است. سن این واحد نفوذی بر پایه سن سنجی انجام شده، ابتدای الیگوسن و سن توده‌های نیمه نفوذی ائوسن پایانی تعیین شده است [۹]. این توده‌ها کم و بیش دگرسان هستند و کانی‌سازی بصورت رگچه‌ای و پراکنده در آنها دیده می‌شود.

به پیش از کانی‌سازی هستند و بخش بزرگی از منطقه را می‌پوشانند. آنها شامل داسیت، آندزیت، توف و توف سنگی هستند و در بخش‌های مختلف منطقه دیده می‌شوند. به سبب نفوذ توده‌های نیمه عمیق مربوط به کانی‌سازی و اثر محلول‌های ماگمایی گرمایی کانه‌دار، سنگ‌های آتشفشانی کنار آنها نیز به شدت دگرسان شده‌اند و کانی‌سازی بیشتر بصورت پراکنده و رگچه‌ای در آنها دیده می‌شود.

توده‌های نفوذی نیمه عمیق حدواسط در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند و از این رو، سن نسبی آنها در نقشه پس از واحدهای آتشفشانی در نظر گرفته شده است. توده‌های نیمه عمیق بصورت دایک و استوک و در ارتباط با کانی‌سازی دیده می‌شوند. این توده‌ها از نظر ترکیبی از مونزونیت تا دیوریت متغیرند و اغلب بافت پورفیری درشت دانه دارند. توده نفوذی



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی ماهور.

بیشتر گسل‌های راست‌الغز منطقه دارای راستای شمالی - جنوبی (SW)، و شمال شرق - جنوب غرب (NE-SW) با مولفه راست گرد هستند. کانه‌زایی‌ها بیشتر در پهنه‌های به شدت خرد شده گسلی تشکیل شده و گسل‌های با روند شمال غرب - جنوب شرق آن را جابه‌جا کرده‌اند. در بخش غربی کانسار، کانه‌زایی در گسل نرمال ماهور با شیب نزدیک به قائم با روندهای N, NE-S, SW انجام شده است. این گسل بیش از ۲ کیلومتر طول دارد و پهنای آن ۲ تا ۳ متر می‌رسد [۱۱].

سنگ‌شناسی

واحدهای آتشفشانی: گدازه‌های آندزیتی عمده‌ترین واحد سنگی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه اکتشافی ماهور هستند و در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن تا مایل به قرمز دیده می‌شوند. این واحد دارای بافت پورفیری است. کانی‌های درشت‌بلور آن پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و از ویژگی‌های آنها می‌توان به ماکل آلبیت پیراشیب، آلبیت کارلسباد و گاهی منطقه‌بندی و بافت غربالی اشاره نمود. هورنبلند کانی اصلی دیگر این واحد بوده که به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در متن سنگ پراکنده است. زمینه از بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های کدر تشکیل یافته است. کانی‌های ثانویه شامل کلسیت و کلریت هستند که از دگرسانی پلاژیوکلازها و هورنبلند تشکیل شده‌اند. این واحد ارتباطی با کانی‌سازی ندارد. توف‌ها در سه نقطه نقشه زمین‌شناسی بصورت رخنمون‌های کوچک دیده می‌شوند و دارای بافت جریانی و قطعه‌های آذرآواری کم و با قطر کمتر از ۱ میلی‌متر هستند. دمای بالای مواد آذرآواری که در مدتی کوتاه روی هم انباشته شده‌اند، موجب متراکم و سخت شدن این مواد گردیده است (شکل ۲ الف). این واحد ارتباطی با کانی‌سازی ندارد. ترکیب زمینه توف‌ها بیشتر آندزیتی است. توف‌های سنگی در دو نقطه نقشه زمین‌شناسی بصورت رخنمون‌های کوچک و متوسط دیده می‌شوند. این واحد دارای قطعه‌های آذرآواری با اندازه بیش از ۱ میلی‌متر است و این قطعه‌ها بر اساس ترکیب به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول دارای ترکیب آندزیتی با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و با زمینه ریزسنگی تا شیشه‌ای بوده و دسته دوم خرده سنگ‌های دگرگونی از نوع شیست هستند. از ویژگی‌های کلی این خرده سنگ‌ها می‌توان به ریختار بیشتر

زاویه‌دار تا بی شکل اشاره نمود که گاهی توسط کلسیت جایگزین شده‌اند (شکل ۲ ب). واحدهای نفوذی: هورنبلند دیوریت پورفیری در بخش شمالی، مرکز و یک توده در جنوب نقشه ۱:۵۰۰۰ رخنمون دارد و دارای پورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط است. درشت بلورها حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد هستند. کانی‌های درشت بلور شامل ۳۰ درصد پلاژیوکلاز با اندازه ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر، ۶ - ۵ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر، ۳ - ۲ درصد پیروکسن از نوع اوژیت با اندازه ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر و ۲ - ۱ درصد کوارتز کوکتر از ۰/۳ میلی‌متر هستند. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل پلاژیوکلاز و کوارتز است. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و اندازه آنها تا ۰/۱ میلی‌متر و مقدار آنها تا ۲ درصد است (شکل ۲ پ). کانی‌های ثانویه کلریت و کلسیت هستند که از دگرسانی هورنبلند و بصورت جزئی از پلاژیوکلاز ایجاد شده‌اند. کوارتز دیوریت پورفیری با دو رخنمون در بخش مرکزی نقشه دیده می‌شود و دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. درشت بلورها حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است. کانی‌های درشت بلور شامل ۳۰ - ۲۵ درصد پلاژیوکلاز با اندازه ۲ تا ۵ میلی‌متر، ۶ - ۵ درصد کوارتز با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر و ۴ - ۳ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر هستند. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل پلاژیوکلاز و کوارتز است. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و مقدار آنها تا ۲ درصد است (شکل ۲ ت). پلاژیوکلاز بصورت جزئی به اپیدوت و کانی هورنبلند به کلریت دگرسان شده‌اند. هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری بیشتر در بخش شمالی نقشه بصورت گسترده رخنمون دارد و دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. درشت بلورها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد هستند. کانی‌های درشت بلور شامل ۲۰ - ۱۵ درصد پلاژیوکلاز با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر، ۸ - ۶ درصد فلدسپار قلیایی با اندازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر، ۷ - ۵ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر و ۵ - ۴ درصد کوارتز کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر هستند. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل فلدسپار و کوارتز است. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و مقدار آنها تا ۱ درصد است (شکل ۲ ث). فلدسپار قلیایی بصورت جزئی به سربیسیت و هورنبلند به کلریت دگرسان شده‌اند. پیروکسن هورنبلند دیوریت بصورت یک استوک کوچک در مرکز نقشه

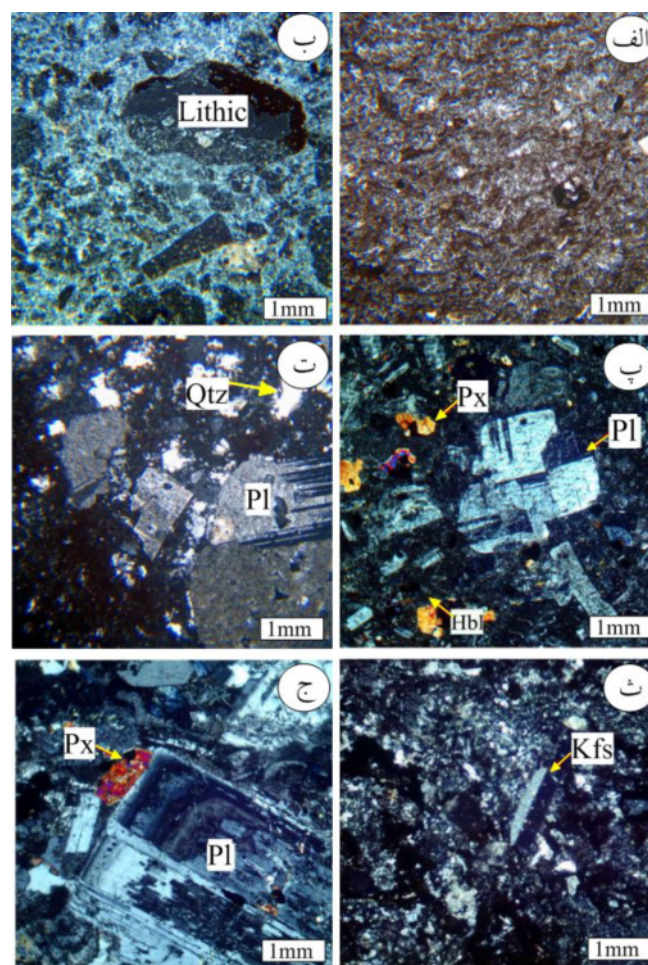
دگرسان شده‌اند.

دگرسانی

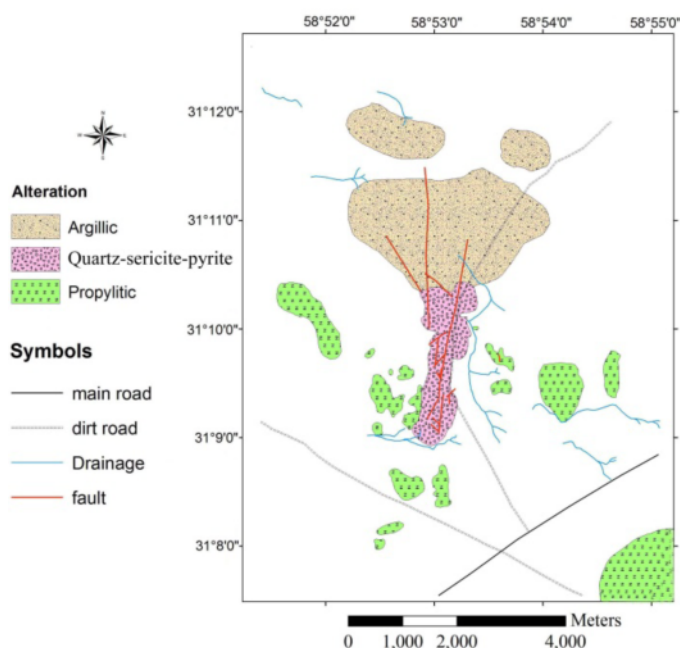
براساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، دگرسانی‌های آرژیلی، پروپیلیتی، فیلی و سیلیسی در بخش‌های سطحی منطقه ماهور شناسایی شده‌اند (شکل ۳).

پهنه آرژیلی به علت شدت بالای کانی‌های رسی با تخریب بافتی همراه است و گستره وسیعی از نقاط کم ارتفاع و تپه ماهوری را شامل می‌شود. کانی‌های رسی فرآورده عمده دگرسانی هستند. بخش بزرگی از واحدهای سنگی دستخوش این دگرسانی شده‌اند. این دگرسانی در لبه کانی‌سازی رگه‌ای نیز تا اعماق دیده می‌شود. باتوجه به فراوانی اکسیدهای آهن ثانویه زیرپهنه دگرسانی هماتیت آرژیلی از پهنه آرژیلی تفکیک شده است.

رخنمون دارد و دارای بافت دانه‌ای است. پلاژیوکلاز به مقدار ۷۵ - ۷۰ درصد بصورت شکل‌دار تا بی شکل با اندازه ۴ تا ۱۰ میلیمتر دیده می‌شود. براساس ویژگی‌های نوری، این پلاژیوکلازها از نوع اولیگوکلاز تا آندزین هستند. حدود ۴ - ۳ درصد کوارتز بصورت نیمه شکل‌دار تا بی شکل در بین دیگر کانی‌ها دیده می‌شود. پیروکسن حدود ۶ - ۵ درصد از نوع اورتیت با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلیمتر حضور دارد. این کانی‌ها به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل و گاهی با ماکل دوقلو در متن سنگ دیده می‌شوند. هورنبلند حدود ۱۰ - ۸ درصد به صورت ستونی، شکل‌دار تا بی شکل با اندازه ۱ تا ۲ میلیمتر در متن سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۲ ج). کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و مقدار آنها تا ۱ درصد است. پلاژیوکلاز بصورت جزئی به اپیدوت و هورنبلند به طور گسترده به کلریت



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی واحدهای سنگی در منطقه اکتشافی ماهور در نور قطبیده متقاطع (XPL): الف) توف، ب) توف سنگی. پ) هورنبلند دیوریت پورفیری، ت) کوارتز دیوریت پورفیری، ث) هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری و ج) پیروکسن هورنبلند دیوریت. Qtz: کوارتز، Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Kfs: فلدسپار پتاسیم و Px: پیروکسن [۱۲].



شکل ۳ نقشه دگرسانی‌های سطحی منطقه معدنی ماهور.

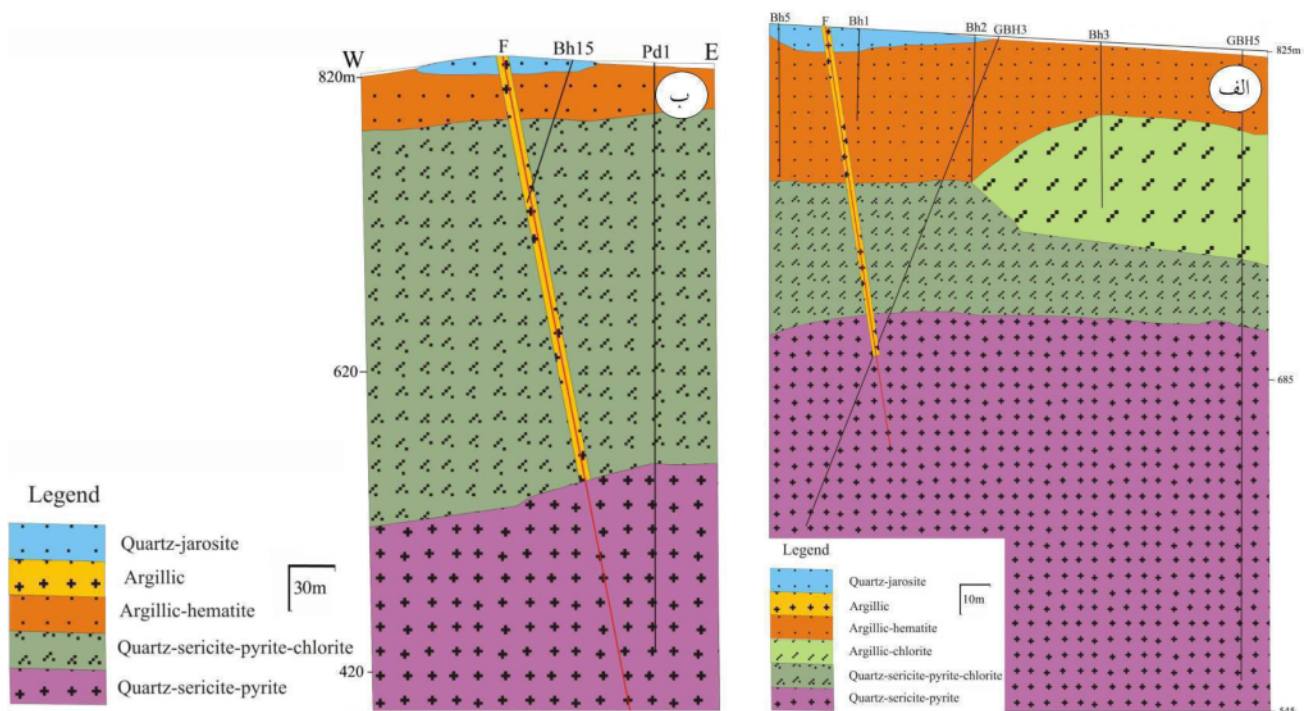
احتمال بسیار در اثر نفوذ سیال‌های گرم دگرسان کننده در راستای شکستگی‌های واحدهای سنگی پیرامون توده‌های نفوذی بوده است. اثر این سیال‌ها بر کانی‌های سنگ ساز واحدهای سنگی و از همه مهمتر فلدسپارهای آن باعث تجزیه این کانی‌ها به فرآورده‌های ثانویه چون سرپسیت شده است. در بخش‌های سطحی، این دگرسانی دستخوش هوازدگی شده و کانی ژاروسیت شکل گرفته است.

دگرسانی سیلیسی به تشکیل کوارتز جدید یا کانی‌های سیلیکاتی بی‌شکل در یک سنگ طی دگرسانی نسبت داده می‌شود. بیشتر شکستگی‌هایی که سیال‌های گرمایی از میان آنها گذشته‌اند، دست‌کم به طور بخشی با کوارتز به شکل پراکنده و یا رگچه پر شده‌اند. در منطقه اکتشافی ماهور، این دگرسانی اغلب همراه با کانی‌سازی سولفیدی دیده می‌شود. کانی کوارتز کانی اصلی این دگرسانی است. این دگرسانی بصورت کلاهدک و رگه در بخش‌های مختلف منطقه گسترش دارد، که البته به دلیل مقیاس نقشه قابل نمایش نیست. در کلاهدک‌های سیلیسی و رگه‌های سیلیسی (دگرسانی سیلیسی) منطقه ماهور، کانی سازی بصورت کانی‌های گالن، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و اسپیکیولاریت دیده می‌شود.

بر اساس نتایج بررسی مغزه‌ها، دو نیمرخ از دگرسانی‌های بخش‌های زیر سطحی منطقه در مقیاس ۱:۱۰۰ تهیه گردید (شکل ۴). این دگرسانی‌ها بیشتر شامل کلریت-فیلی، فیلی و آرژیلی برونزاد هستند.

دگرسانی پروپلیتی گسترش بسیاری دارد و بخش قابل توجهی از واحدهای نفوذی و آتشفشانی دستخوش آن شده‌اند. واحد نفوذی پیروکسن هورنبلند دیوریت و واحد آتشفشانی آندزیتی دچار این دگرسانی شده و کانی‌های کلریت، سرپسیت، کلسیت و اپیدوت در آن شکل گرفته‌اند که در زمینه سنگ و به صورت جانمایی در درشت‌بلورهای مافیک و بخشی از بلورهای فلدسپار دیده می‌شوند. مقدار این کانی‌ها در نقاط مختلف متفاوت است. مقدار اپیدوت از ۱۵ تا ۲۵ درصد و کلریت از ۲۰ تا ۲۵ درصد متغیر است. اغلب این کانی‌ها ناشی از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین چون هورنبلند هستند. کانی اصلی دگرسانی از نظر فراوانی فراوانی کلریت بوده که در برخی مقاطع نازک میکروسکوپی، بطور کامل جایگزین هورنبلند شده است. کانی‌سازی پیریت به صورت افشان در این پهنه دیده می‌شود. کانی‌سازی شناسایی شده در منطقه ارتباط مشخصی با این دگرسانی نشان نمی‌دهد و به نظر می‌رسد که این دگرسانی کنترل سنگ‌شناسی دارد.

دگرسانی فیلی (کوارتز+سرپسیت+پیریت) در بخش مرکزی منطقه گسترش دارد و دربردارنده کانی‌سازی پراکنده پیریت و کالکوپیریت است. این دگرسانی بیشتر در واحدهای کوارتز مونوزودیوریت و کوارتز مونزونیت پورفیری دیده می‌شود. کانی‌های این دگرسانی شامل کوارتز+سرپسیت+پیریت و گاهی کلریت هستند. بخش اصلی کانی‌سازی در مغزه‌های حفاری مربوط به این پهنه دگرسانی است. تشکیل این دگرسانی به



شکل ۴ الف و ب) توزیع دگرسانی‌ها در بخش‌های زیر سطحی منطقه ماهور.

کانی‌شناسی و توالی همبرزایی

کانی‌سازی در منطقه ماهور به سه صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و افشان دیده می‌شود.

کانی‌سازی رگه‌ای در بخش مرکزی کانسار مشاهده می‌گردد. رگه یاد شده دارای روند N18W با شیب 80NE درجه، ضخامت متغیر ۱-۲ متر و طول تقریبی تا ۳۰۰۰ متر است. در بخش‌های سطحی این رگه، اکسید و هیدروکسیدهای آهن، آتاکامیت، گوتیت، پیرولولزیت، هماتیت، لیمونیت، کالکوسیت، لیناریت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت دیده شد. این رگه کانی‌سازی شده در بخش‌های مختلف توسط گسل‌های عرضی راستالغز بریده و جابجا شده است. ذخیره قطعی بخش رگه‌ای تا عمق پیجویی شده (۴۰ متر) و با در نظر گرفتن عیار حد ۰/۶ درصد مس، پنجاه و هشت هزارتن کانسنگ با عیار میانگین ۱/۸ درصد مس و ۰/۵ درصد روی برآورد شده است [۱۳].

کانی‌سازی افشان بصورت گسترده در منطقه اکتشافی ماهور مشاهده می‌شود. کانی‌های سولفیدی مهمی که در این منطقه بصورت افشان دیده می‌شوند بیشتر شامل پیریت و به مقدار کمتر کالکوپیریت هستند. بیش از ۵۰ درصد این کانی‌ها به اکسیدهای آهن ثانویه چون هماتیت و گوتیت و همچنین کانی ژاروسیت تبدیل شده‌اند. کانی‌سازی افشان شامل پیریت

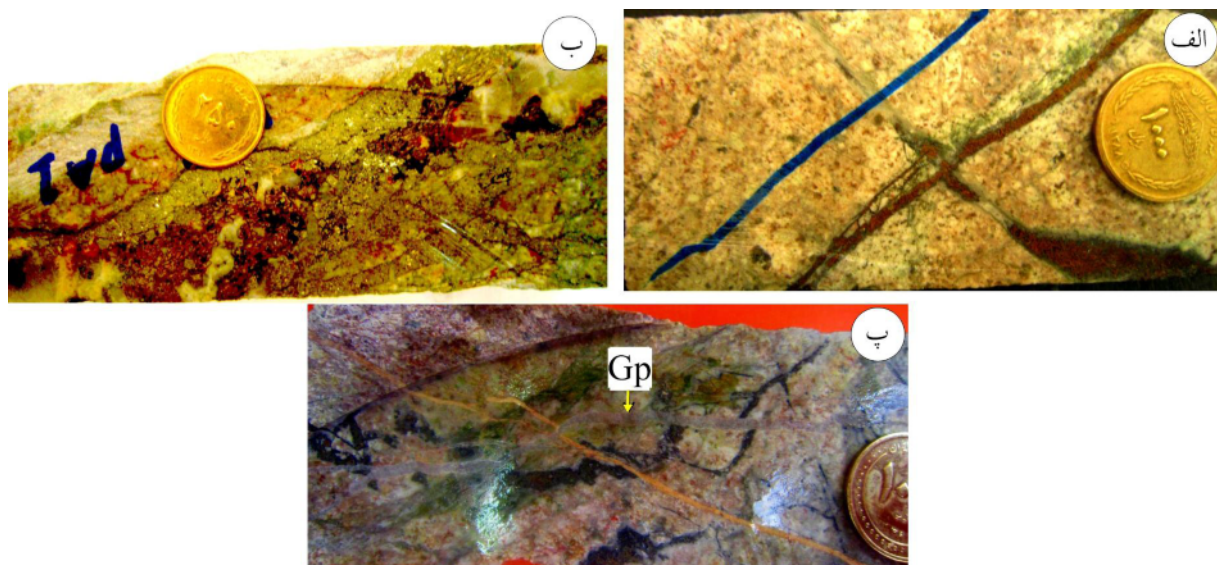
(۱ تا ۶ درصد) و اکسیدهای آهن (۱ تا ۷ درصد) است که به صورت دانه پراکنده در متن سنگ تشکیل شده‌اند. بیشترین پراکندگی کانی‌سازی افشان در پهنه فیلی دیده می‌شود. کانی ژاروسیت به طور گسترده در این منطقه تشکیل شده است. این کانی به صورت ثانویه در محیط‌های اسیدی و غنی از سولفات تشکیل می‌شود [۱۴]. در این منطقه، کانی ژاروسیت بیشتر در لبه‌های سطوح بلوری پیریت ایجاد شده و در برخی مقاطع به طور کامل جایگزین پیریت شده است.

کانی‌سازی رگچه‌ای در مغزه‌های حفاری شناسایی شد. رگچه‌ها بر پایه روابط فضایی با هم (قطع‌شدگی) و ترکیب کانی‌شناسی از قدیم به جدید عبارتند از: (۱) رگچه کوارتز+اسفالریت+پیریت ± کالکوپیریت که با ضخامت‌هایی از کمتر از ۱ میلیمتر تا بیش از ۵ سانتی متر در اعماق مختلف دیده می‌شوند (شکل ۵ الف)، (۲) رگچه کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± اسفالریت با ضخامت‌هایی از کمتر از ۱ میلیمتر تا بیش از ۳ سانتیمتر در اعماق مختلف (شکل ۵ ب) و (۳) رگچه سنگ گچ بدون کانی‌سازی (شکل ۵ پ).

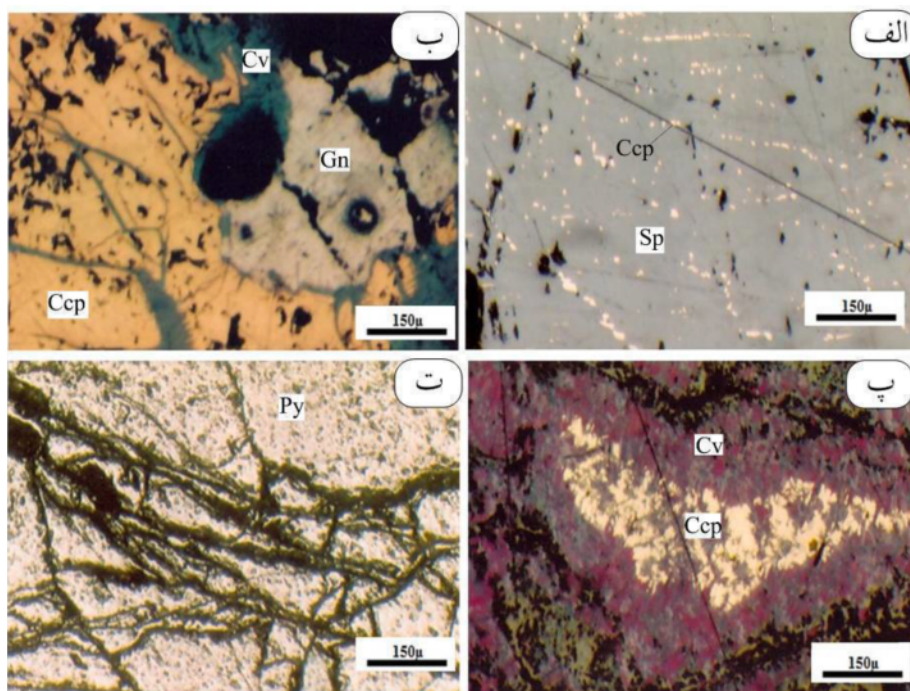
بر اساس بررسی‌های کانی‌نگاری، عمده بافت‌های دیده شده در کانه‌ها پرکننده فضاهای خالی، بافت ناآمیختگی (شکل ۶ الف)، جانشینی (شکل‌های ۶ ب و پ)، و برشی (شکل ۶ ت)

لیمونیت، کالکوسیت، لیناریت، سروزیت، آنکلیزیت، کولیت، ملاکیت و آزوریت کانی‌های برآمده از فرایندهای اکسایش در منطقه هستند. بر پایه نتایج ریزپردازش الکترونی [۱۱]، سولفوسالت‌های بیسموت و سولفید کادمیم نیز در ماهور وجود دارند.

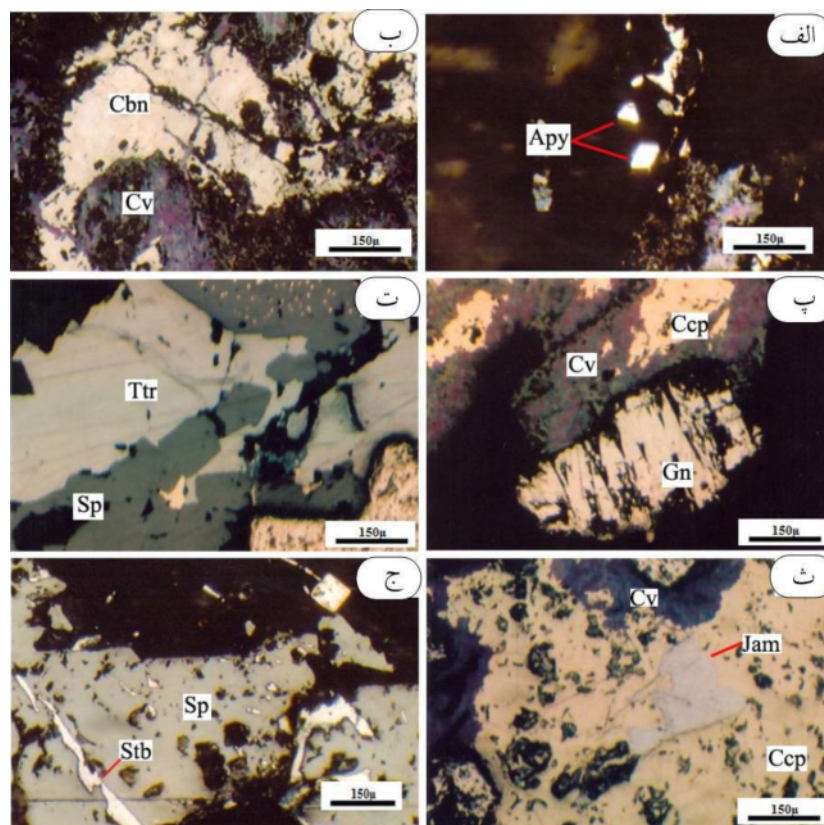
هستند. همچنین بر اساس این بررسی‌ها، پیریت، آرسنوپیریت، کوبانیت، کالکوپیریت، کوولیت، گالن، اسفالریت، تترائدریت، جیمسونیت و استینیت مهم‌ترین کانی‌های درونزاد شناسایی شده در منطقه ماهور هستند (شکل ۷). اکسید و هیدروکسیدهای آهن، آتاکامیت، گوتیت، پیرولولزیت، هماتیت،



شکل ۵. نمایی از کانی‌سازی رگچه‌ای در بخش‌های عمقی منطقه ماهور: (الف) رگچه کوارتز+اسفالریت+پیریت - $\pm$ کالکوپیریت، (ب) رگچه کوارتز + پیریت + کالکوپیریت - $\pm$ اسفالریت و (پ) رگچه سنگ گچ بدون کانی‌سازی. (Gp: سنگ گچ [۱۲]).



شکل ۶. نمایی از بافت‌های مختلف در کانه‌های کانسار ماهور: (الف) بافت جدایشی، اسفالریت کانی میزبان و قطرک‌های ریز کالکوپیریت فاز جدا شده از آن، ب و پ) تبدیل‌شدگی کالکوپیریت به کوولیت در لبه، ت) نمایی از بافت برشی در پیریت. (Ccp: کالکوپیریت، Sp: اسفالریت، Cv: کوولیت، Gn: گالن و Py: پیریت [۱۲]).



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های کانسار ماهور: الف) بلور شکل‌دار آرسنوپیریت، ب) بلورهای توده‌ای و بی شکل کوبانیت که در لبه در حال تبدیل شدن به کولیت هستند، پ) بلور گالن با قطعه‌های مثلی کشیده همراه با کلکوپیریت و کولیت، ت) کانی بی شکل تتراکدریت همراه با اسفالریت، ث) جیمسونیت به صورت میانبار در کالکوپیریت و ج) کانی استینیت به صورت بلورهای باریک و کشیده. (Apy: آرسنوپیریت، Cbn: کوبانیت، Cv: کولیت، Gn: گالن، Ccp: کالکوپیریت، Sp: اسفالریت، Ttr: تتراکدریت، Jam: جیمسونیت و Stb: استینیت [۱۲]).

هستند. توالی همبرزایی مجموعه‌های کانایی در منطقه ماهور در شکل ۸ نشان داده شده است.

میانبارهای سیال

سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر در منطقه ماهور بر ۱۲ مقطع دوبرصیقل تهیه شده از کانی‌های کوارتز و اسفالریت (۱) رگچه‌های کوارتز+اسفالریت+پیریت ± کالکوپیریت و (۲) رگچه‌های کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± اسفالریت از پهنه دگرسانی کوارتز-سریسیت-پیریت بخش‌های زیر سطحی انجام شد. بر این اساس، میانبارهای سیال در کوارتز و اسفالریت بیشتر از نوع دو فازی غنی از مایع و چند فازی مایع-گاز-جامد هستند (شکل ۹). این میانبارها با شکل‌های کروی تا بیضی، میله‌ای و نامنظم دارای طول ۵ تا ۱۸ میکرون و عرض ۳ تا ۷ میکرون هستند. نتایج دماسنجی، مقادیر شوری و چگالی سیال‌های درگیر در رگچه‌های نوع ۱ و ۲ در جدول ۱ ارائه شده است. گفتنی است که شوری و چگالی بر اساس داده‌های نرم افزار

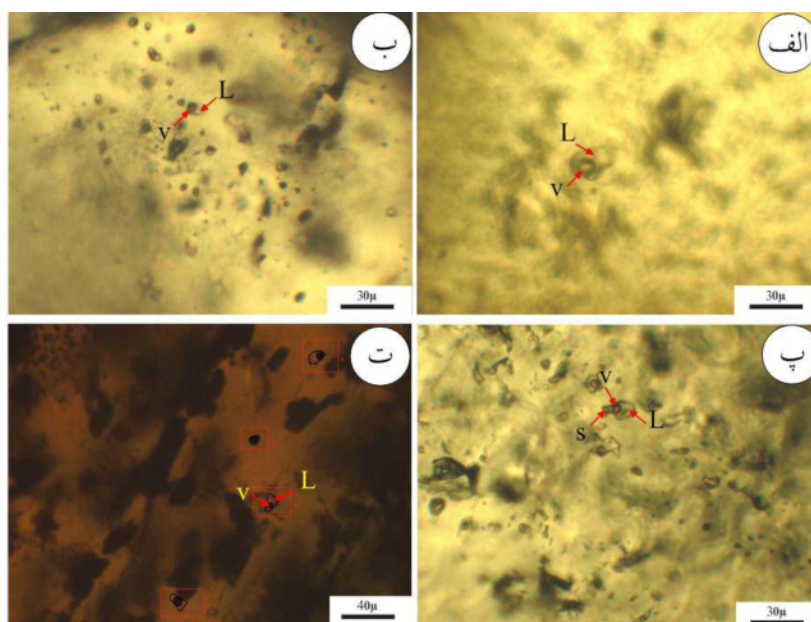
تعبیر و تفسیر زایشی در منطقه اکتشافی ماهور براساس بررسی‌های کانینگاری، بطور کلی نشانگر چهار فاز عمده کانی-سازی است. فاز اول با کانی‌سازی پیریت بصورت افشان در متن توده‌های نیمه عمیق چون کوارتزومونزودیوریت پورفیری و کوارتزومونزویت پورفیری مشخص می‌شود. فاز دوم با برش گرمایی شناسایی می‌گردد. کانی‌سازی بیشتر پیریت در زمینه برش و کانی‌سازی فاز اول در قطعه‌های برش دیده می‌شوند. فاز سوم با همبری پیریت و محلول جامد اسفالریت کالکوپیریت مشخص بوده و نشاندهنده کانی‌سازی در دمای بالا است. رگچه‌های نوع ۱ در این فاز تشکیل شده‌اند. شواهدی چون بافت نامیختگی بین اسفالریت و کالکوپیریت و وجود رنگ خاکستری تیره در اسفالریت (که بیانگر وجود FeS در شبکه اسفالریت بوده و این وضعیت تنها در دمای بالا امکان پذیر است) دمای بالای سیال گرمایی را در فاز سوم نشان می‌دهد. فاز چهارم با تشکیل رگچه‌های نوع ۲ مشخص می‌شود. کانی-های همبرزادی شامل پیریت + کالکوپیریت ± اسفالریت

NaCl، CaCl_2 هستند و شوری سیال در رگچه‌های نوع ۱ بین ۶/۸ تا ۲۱/۲ با میانگین ۱۳/۵ درصد وزنی و در رگچه‌های نوع ۲ بین ۷/۹ تا ۲۰/۲ با میانگین ۱۲/۱ درصد وزنی محاسبه شده است. نمودار ستونی فراوانی دمای همگن‌شدگی و شوری میانبرهای سیال در رگه‌های نوع ۱ و ۲ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

FLINCOR و بر پایه رابطه مرجع [۱۵] محاسبه شده است. دمای همگن‌شدگی فاز بخار سیال‌های درگیر در رگچه‌های نوع ۱ برابر با ۵۷۵ - ۳۱۵ با میانگین ۴۱۰ درجه سانتیگراد و برای رگچه‌های نوع ۲ برابر با ۳۹۴ - ۱۷۷ با میانگین ۳۳۰ درجه سانتیگراد است. با توجه به میانگین دمای همگدازی (Tfm) که ۵۵- درجه سانتیگراد است، فازهای نمک موجود از نوع KCl،



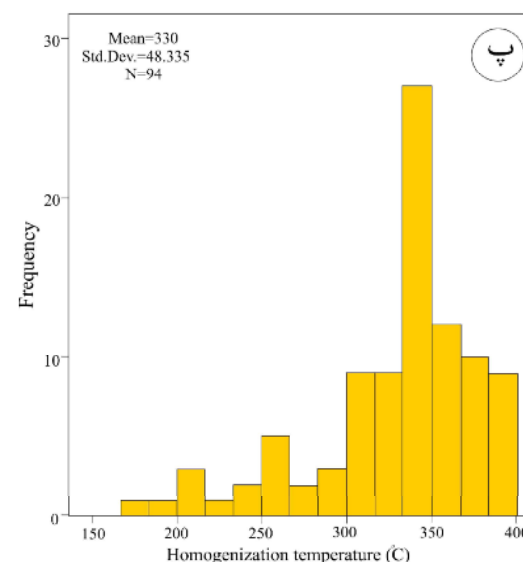
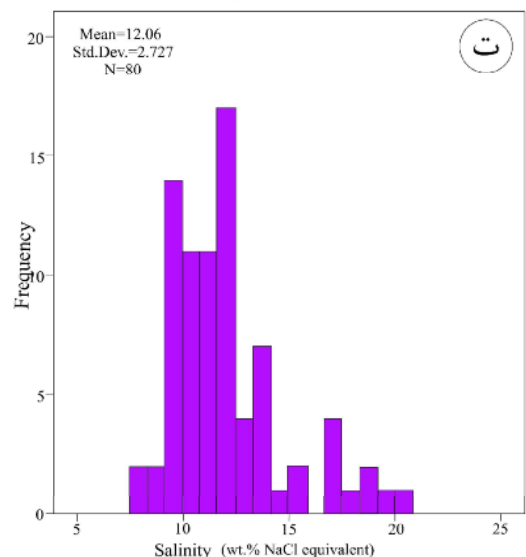
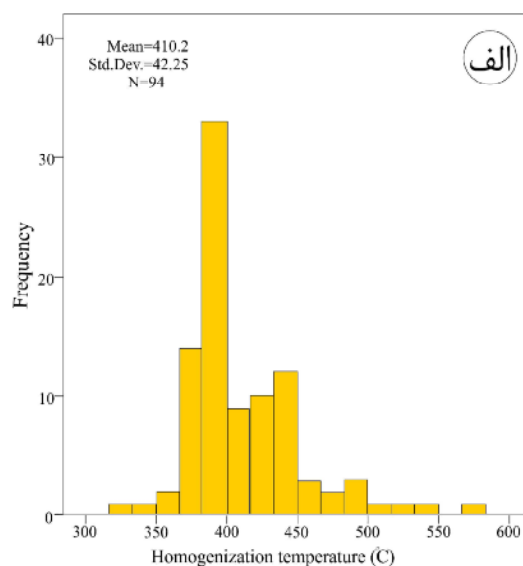
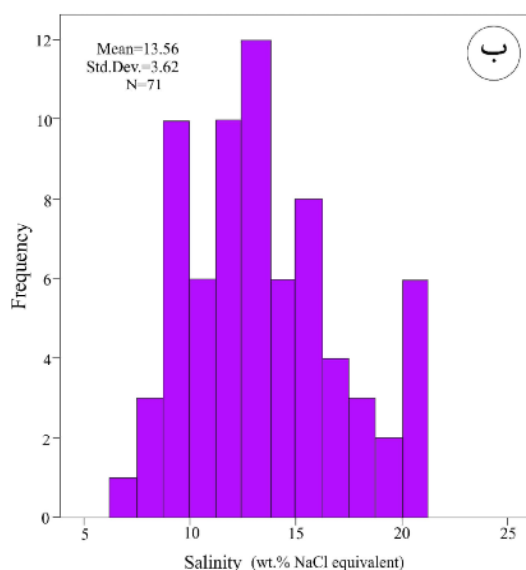
شکل ۸ توالی همبرزایی مجموعه کانیایی در منطقه ماهور. در شکل سوپرژن ← برونزاد هیپوژن ← درونزاد.



شکل ۹ تصاویر میکروسکوپی از میانبرهای سیال منطقه ماهور: الف) سیال‌های درگیر با دو فاز مایع و گاز در کانی کوارتز، ب) فراوانی سیال‌های درگیر با دو فاز مایع و گاز و با شکل‌های بیضوی و نامنظم در کانی کوارتز، پ) سیال‌های درگیر با سه فاز مایع، گاز و جامد در کانی کوارتز و ت) سیال‌های درگیر با دو فاز مایع و گاز در کانی اسفالریت.

جدول ۱ نتایج ریزدماسنجی رگه‌های نوع ۱ و ۲ در ماهور.

نوع رگچه	نوع میانبار	دمای همگدازی T _{fm} °C	دمای ذوب یخ T _m °C	دمای همگن‌شدگی Th °C	شوری Wt% NaCl	چگالی
نوع ۱	L-V	-۵۴ تا -۵۸٫۷	-۴٫۳ تا -۱۸٫۴	۳۱۵ تا ۵۷۵	۶٫۸ تا ۲۱٫۲	۰٫۴ تا ۰٫۸
نوع ۲	L-V	-۵۵ تا -۵۸٫۵	-۵٫۱ تا -۱۶٫۴	۱۷۷ تا ۴۵۴	۷٫۹ تا ۲۰٫۲	۰٫۵ تا ۰٫۹
	L-V-S	-۵۵ تا -۵۷٫۸	-۵٫۹ تا -۶٫۸	۳۴۱ تا ۳۵۲	۹٫۱ تا ۱۰٫۲	۰٫۷۳ تا ۰٫۷۶



شکل ۱۰ الف و ب) نمودارهای فراوانی مقادیر شوری و دمای همگن‌شدگی رگه‌های نوع ۱. پ و ت) نمودارهای فراوانی مقادیر شوری و دمای همگن‌شدگی رگه‌های نوع ۲.

نوع ۱ منطقه ماهور در گستره‌ای با شوری متوسط و دمای بالا قرار دارند و روند مشخص آمیختگی سیال را نشان می‌دهند. در روند آمیختگی دو سیال، دو سیال با دمای یکسان و شوری

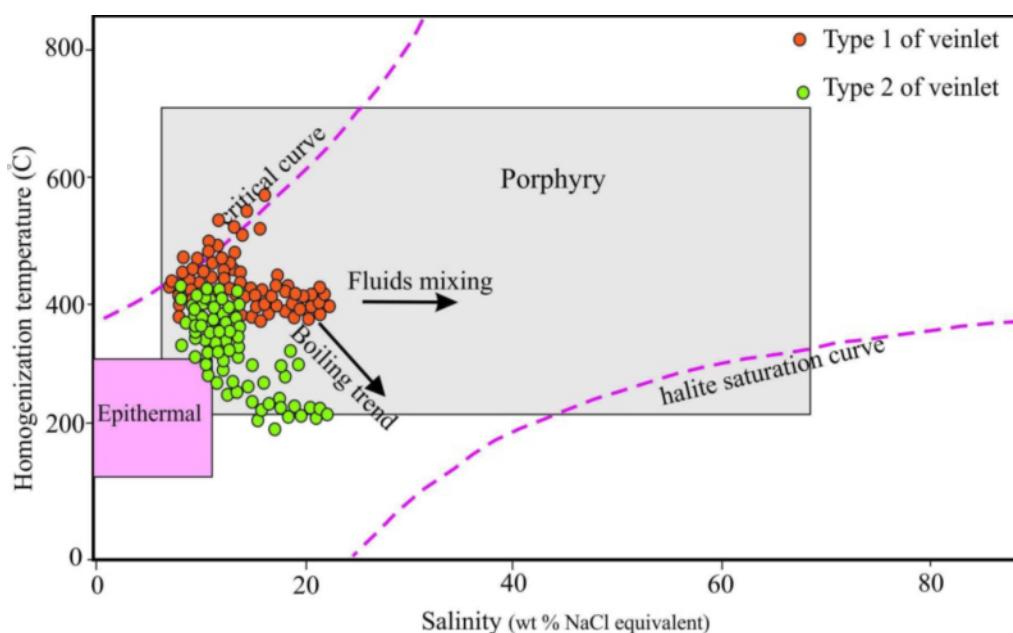
بر اساس منحنی دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری، روند تکاملی سیال کانی‌ساز در منطقه ماهور در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر این اساس، داده‌های ریزدماسنجی برای رگه‌های

ایزوتوپ‌های گوگرد

نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های گوگرد کانی‌های سولفیدی کانسار ماهور در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ گوگرد احیایی (H_2S) سیال در تعادل با کالکوپیریت و پیریت بر پایه دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر مربوطه به نمونه‌ها به ترتیب از رابطه جدایش مراجع [۲۰-۲۲] محاسبه شد. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در کالکوپیریت دارای گستره تغییراتی از ۱/۹ تا ۲/۹۵ در هزار و مقدار متوسط ۲/۶ در هزار است. پیریت دارای مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ از ۲/۸۹ تا ۳/۹۲ در هزار و مقدار متوسط ۳/۵ در هزار است (شکل ۱۲). مقدار $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدها در کانسارهای پورفیری بین ۵- تا ۵ در هزار است [۲۳-۲۵]. در جدول ۳ مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانسار ماهور با چند کانسار پورفیری مقایسه شده است. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدهایی با خاستگاه ماگمایی و آذرین به ترتیب ± 2 در هزار [۲۱، ۲۶] و ۲- تا ۱۰ در هزار [۲۷] است. مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ در سولفیدهای کانسار ماهور حدود ۲/۵ در هزار بوده که این نشان‌دهنده تشکیل کانی‌های سولفیدی از سیالی است که گوگرد آن خاستگاه ماگمایی دارد. در نتیجه، گوگرد در کانی‌های سولفیدی این کانسار می‌تواند مستقیم از سیال ماگمایی و یا در اثر انحلال و آب شویی منابع آذرین سولفیددار پیشین ناشی شده باشد.

متفاوت با هم مخلوط شده‌اند که این امر موجب کاهش شوری و تغییر نکردن دمای سیال‌های درگیر نسبت به ترکیب اولیه شده است. داده‌های ریزدماسنجی برای رگچه‌های نوع ۲ منطقه ماهور در گستره‌ای با شوری متوسط و دمای بالا تا متوسط قرار دارند و روند مشخص جوشش را نشان می‌دهند. داده‌های ریزدماسنجی رگچه‌های نوع ۱ و ۲ ماهور در گستره سامانه‌های پورفیری قرار دارند. از آنجا که شوری این سیال‌ها در حد متوسط بوده به احتمال بسیار کانی‌سازی ماهور در لبه یک سامانه پورفیری واقع است. تغییرات شوری سیال‌های درگیر می‌تواند ناشی از آمیختگی سیال‌های مختلف با شوری‌های متفاوت [۱۶]، به تله افتادن سیال‌های درگیر در مراحل مختلف کانی‌سازی و یا به دلیل حذف انتخابی آب از سیال بدام افتاده توسط سازوکار جدایش باشد [۱۷].

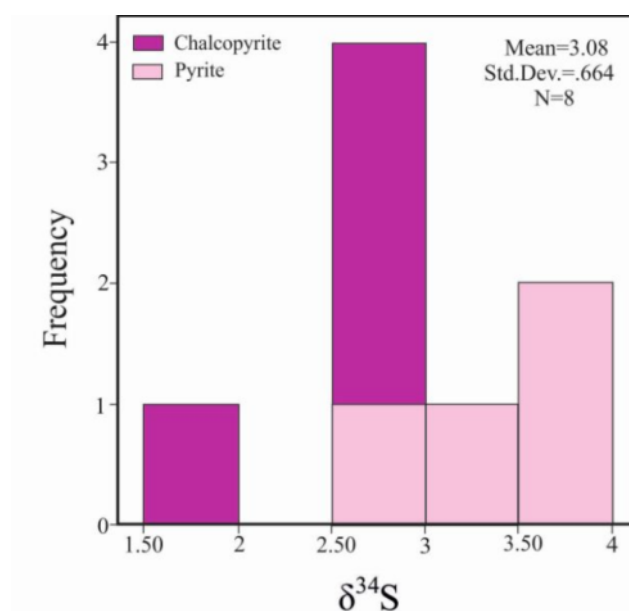
بر اساس یافته‌های مراجع [۱۸، ۱۹]، کمپلکس‌های کلریدی در کانسارهای با دمای تشکیل بیش از ۳۰۰ درجه سانتیگراد غالب هستند. از آنجا که میزان شوری سیال‌های تشکیل دهنده کانسار متوسط بوده و میانگین دمای تشکیل در رگچه‌های نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۴۱۰ و ۳۳۰ درجه سانتیگراد است، بنظر می‌رسد که کلریدهای محلول چون NaCl و CaCl_2 نقش مهمی در انتقال فلزات داشته‌اند.



شکل ۱۱ موقعیت داده‌های ریزدماسنجی منطقه ماهور در نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی (برگرفته از مرجع [۲۰] با کمی تغییر).

جدول ۲ مقدار ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانی‌های سولفیدی کانسار ماهور

کانی	$\delta^{34}\text{S}_{\text{min}}(\%)$	T(°C)	$1000\ln \alpha$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S fluid}}(\%)$
پیریت	۳٫۹۲	۳۷۴	۱	۲٫۹۲
پیریت	۲٫۸۹	۳۶۷	۱	۱٫۸۹
پیریت	۳٫۸۹	۴۷۰	۰٫۷	۳٫۱۵
پیریت	۳٫۴۳	۳۱۸	۱٫۱	۲٫۳۳
کالکوپیریت	۱٫۹	۳۷۴	۰٫۱	۱٫۸
کالکوپیریت	۲٫۷۴	۳۶۷	۰٫۱	۲٫۶۴
کالکوپیریت	۲٫۸۸	۴۷۰	۰٫۱	۲٫۷۸
کالکوپیریت	۲٫۹۵	۳۱۸	۰٫۱	۲٫۸۵

شکل ۱۲ نمودار ستونی فراوانی مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در کانی‌های سولفیدی ماهور.

جدول ۳ مقایسه مقادیر نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد کانسار ماهور با چند کانسار پورفیری.

نام کانسار	$\delta^{34}\text{S}$ پیریت (%)	$\delta^{34}\text{S}$ کالکوپیریت (%)	مرجع
مس پورفیری دره زار	۱٫۷ تا ۳٫۹	۱٫۶ تا ۱٫۹	[۲۸]
مس پورفیری پرکام	۰٫۷ تا ۲٫۹	۲٫۶ تا ۲٫۳	[۲۹]
مس پورفیری سرچشمه	۰٫۲۸ تا ۲٫۶	۰٫۶۳	[۳۰]
مس پورفیری فاکسینگ، چین	۱٫۹ تا ۰٫۸	-۱٫۳	[۳۱]
مس - مولبدن پورفیری تیانهگزینگ، چین	۲٫۸ تا ۳٫۴	۲٫۱ تا ۳٫۶	[۳۲]
کانسار ماهور	۲٫۸۹ تا ۳٫۹۲	۱٫۹ تا ۲٫۹۵	این پژوهش

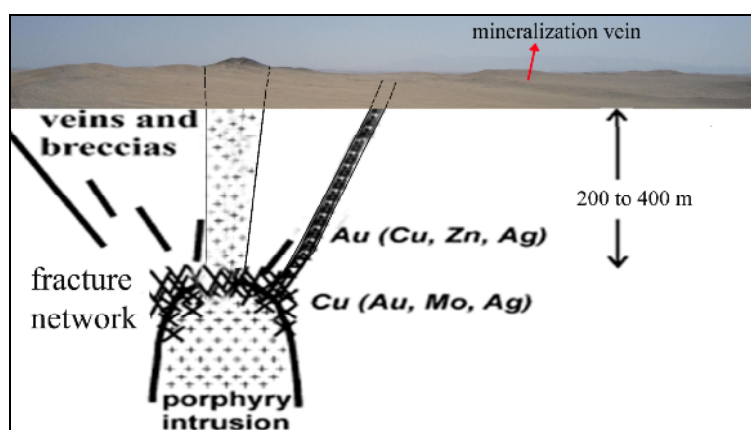
برداشت

ذخایر مس پورفیری اغلب در جایگاه کمان اقیانوسی و کمان قاره‌ای و همچنین در مناطق کششی پس از برخورد تشکیل می‌شوند [۳۳-۳۵].

تکامل اقیانوس نئوتتیس در ایران با انواع مختلفی از کانی‌سازی و ذخایر مس پورفیری همراه بوده است. ذخایر مس پورفیری در ایران در سه کمربند ارسباران، بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه-دختر و شرق ایران متمرکز هستند [۳۶]. فعالیت ماگمایی ترشیری در منطقه لوت-سیستان در شرق ایران به تکامل اقیانوس سیستان نسبت داده شده است [۳۷]. اقیانوس سیستان به احتمال بسیار طی پالئوسن پسین-ائوسن پیشین با فروورانش همزمان به سمت افغان و ایران (قطعه لوت) [۳۸] یا فروورانش به سمت ایران (به زیر قطعه لوت) [۳۹] بسته شده است. فعالیت ماگمایی پس از برخورد در راستای خط درز شمالی-جنوبی بیش از ۱۰۰۰ کیلومتری مجموعه‌های رتوک و نه و همچنین قطعه لوت طی ائوسن تا الیگوسن [۲، ۴۰]، به نابودی سنگ‌کره و صعود زبانه‌های سست‌کره‌ای طی رمبش کششی شرق ایران نسبت داده شده است [۴۱]. در اثر این رویداد کانسارهای پورفیری و رگه‌ای متعددی در قطعه لوت تشکیل شده است [۴۰]. چند کانسار پورفیری $Cu \pm Mo \pm Au$ که تاکنون شناخته شده‌اند شامل ماهر آباد [۴۲، ۴۳]، خوپیک یا شادان [۴۲]، ده سلم و چاه شلغمی [۳۸، ۴۴] هستند.

منطقه ماهر در غرب کانسار ده سلم از نظر جایگاه زمین-ساختی در موقعیتی مشابه قرار دارد. کانی‌سازی در پورفیری‌ها با فراوانی رگچه‌های سولفیدی و دگرسانی کوارتز سربست و بطور محلی دگرسانی فرعی اپیدوت مشخص می‌شود [۴۵]. در منطقه اکتشافی ماهر، کانی‌سازی سولفیدی مس و روی بصورت رگه و رگچه‌های پیریت $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ اسفالریت و پراکنده (پیریت $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ اسفالریت) همراه با دگرسانی فیلی و آرژیلی دیده می‌شود. دمای تشکیل و شوری سیال‌های گرمایی که ذخایر پورفیری را شکل می‌دهند، ۲۰۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد و ۷۰-۰ درصد وزنی معادل NaCl است [۲۰]. براساس بررسی سیال‌های درگیر رگه‌های کوارتزی سولفیدی در منطقه ماهر، میانگین دمای تشکیل ۳۷۱ درجه سانتیگراد و میانگین شوری ۸/۱۲ درصد وزنی معادل NaCl است. مقدار $\delta^{34}S$ اولیه در سامانه‌های ماگمایی برآمده از جبه حدود 0 ± 3 .

در هزار است [۲۱]. مقدار $\delta^{34}S$ کانی‌های سولفیدی منطقه ماهر با میانگین ۲/۵ در هزار بیانگر خاستگاه گوشته‌ای گوگرد موجود در کانی‌های سولفیدی است. دگرسانی پتاسیمی با وجود حفاری‌های عمیق (بیش از ۳۹۲ متر) در کانسار ماهر دیده نشده است. دگرسانی فیلی در منطقه اکتشافی ماهر با انباشت‌های کانی‌های ثانویه سرسیت + کوارتز + پیریت مشخص شده و افزون بر این کانی‌ها، کانی ثانویه کلریت نیز بیش از سایر ذخایر مس پورفیری کمان قاره‌ای در منطقه دیده می‌گردد. دگرسانی آرژیلی در منطقه اکتشافی ماهر بیشتر کنترل ساختاری دارد و پیرامون دگرسانی فیلی چنانکه در مدل مرجع [۴۶] ارائه شده است، مشاهده نمی‌شود. همچنین تفکیک دقیق دگرسانی‌های فیلی از آرژیلی در منطقه اکتشافی ماهر مشکل است. دگرسانی پروپلیتی نیز در کنترل سنگ‌شناسی دارد، به طوری که توده‌های دیوریتی و آندزیتی بیشتر دگرسانی پروپلیتی با کانی غالب کلریت و کانی‌های کربناتی نشان می‌دهند. غلظت عناصر فلزی در منطقه اکتشافی ماهر با عناصر مس و روی مشخص می‌شود [۴۷]. مقدار عنصر روی بسیار بیشتر از آن است که اغلب در ذخایر مس پورفیری جایگاه‌های کمان قاره‌ای دیده می‌شود [۴۶، ۴۸]. کانی غالب مس‌دار در منطقه اکتشافی ماهر کالکوپیریت همراه با مقادیر فرعی بورنیت و کولیت است. کانی‌سازی مس بیشتر در پهنه دگرسانی فیلی مشاهده می‌شود. همچنین کانی غالب روی‌دار در منطقه اسفالریت است و در پهنه دگرسانی فیلی دیده می‌شود. پهنه غنی شده بروزاد که اغلب در ذخایر مس پورفیری محیط‌های کرانه قاره‌ای مشاهده می‌گردد [۴۶]. در منطقه اکتشافی ماهر وجود نداشته و یا گسترش بسیار محلی و محدود دارد. تفاوت‌های بیان شده بین منطقه اکتشافی ماهر با دیگر ذخایر مس پورفیری جایگاه‌های کمان قاره‌ای چون مدل دگرسانی و کانی‌سازی را می‌توان بر اساس تغییرات گسترده ساختاری، عمقی، اندازه و مدت زمان نفوذ توده‌های نفوذی، هجوم آب‌های زیرزمینی، دگرگونی مواد فرار منابع ماگمایی و ترکیب سنگ‌های دربرگیرنده توضیح داد [۴۹]. در مجموع و براساس همه شواهد، کانی‌سازی در منطقه اکتشافی ماهر بخشی از یک سامانه پورفیری عمیق‌تر بوده که در ارتباط با فروورانش پوخته اقیانوسی سیستان به زیر لوت تشکیل شده است. مدلی طرح‌وار برای رخداد کانی‌سازی ماهر در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳ مدل طرحوار احتمالی از رخداد سامانه مس پورفیری و ارتباط آن با پهنه برشی و رگه‌های فراگرمایی منطقه اکتشافی ماهور (تصویر پایه برگرفته از مرجع [۵۰] است).

مس پورفیری که نشان می‌دهد که کانی‌سازی شناسایی شده در منطقه اکتشافی ماهور در بخش بالایی و یا لبه‌ای یک سامانه پورفیری قرار دارد.

مراجع

- [1] Esmaeily D., Nedelec A., Valizadeh M.V., Moore F., Cotton J., "Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization", Journal of Asian Earth Sciences 25(2005) 961-980.
- [2] Karimpour M. H., Stern C. R., Farmer L., Saadat S., "Malekezadeh A. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran", JGeop 1 (2011) 19-36.
- [3] Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran: a review", American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52 (1968) 1229-1258.
- [4] Mirzaei Rayeni R., Ahmadi A., Mirnejad H., "Mineralogy and fluid inclusion studies in Mahour copper deposit, East of Lut block, central Iran (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012), 307-318.
- [5] M Esform., "Geochemistry and paragenesis sequence of minerals in Mahoor poly metal deposit, West of Nehbandan (East of Iran), (in Persian)", Msc thesis, Sistan and Balochestan University(2011).
- [6] Esform M., Biabangard B., Bomeri M., Zarinkob M.H., Mahram M., Ebrahimi., V.,

شواهد زیر این احتمال را تقویت می‌کند:

- ارتباط کانی‌سازی با توده‌های نیمه عمیق حدواسط آهکی-قلیایی پورفیری در حد مونزونیت تا دیوریت،
- دگرسانی گسترده منطقه که رابطه تنگاتنگی با توده‌های نفوذی دارد و شامل پهنه‌های دگرسانی آرژیلی، کوارتز سرسیت کلریت پیریت و پروپلیتی است،
- کانی‌سازی گسترده منطقه به شکل‌های داربستی، پراکنده و برش گرمایی که مهمترین حالت آن بافت داربستی است و در برخی نقاط تا بیش از ۳۰ رگچه کوارتز سولفیدی در یک متر طول گمانه دیده می‌شود،
- مجموعه کانیایی درونزاد شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و اسفالریت،
- ناهنجاری بالای مس (متوسط ۰/۵ درصد) و روی (متوسط ۱/۵ درصد) [۴۷]،
- درصد شوری و دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر که در گستره ویژگی‌های سیال‌های درگیر ذخایر پورفیری قرار دارند،
- شباهت نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد کانی‌های سولفیدی منطقه با این نسبت‌ها در کانسارهای پورفیری،
- موقعیت زمین‌ساختی توده‌های نفوذی که در کمان ماگمایی پهنه فرورانش شکل گرفته‌اند، و
- ظهور پهنه دگرسانی کوارتز-سرسیت-کلریت-پیریت و دیده نشدن پهنه دگرسانی پتاسیمی حتی در گمانه‌های عمیق و همچنین بالا بودن مقدار عنصر روی نسبت به سایر ذخایر

- inclusion studies*", *Geochim. Acta* 53 (1989) 1209-1221.
- [16] Sheppherd T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., "*A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*", Blackie and Son (1985) 239 p.
- [17] Hall A. J., Boyee A. J., Fallick A. E., Hamilton P. J., "*Isotopic evidence of the depositional environment of Late Proterozoic stratiform barite mineralisation, Aberfeldy, Scotland*", *Chem. Geol. Isotope Geosci. Sect.* 87 (1991) 99-114.
- [18] Seward T. M., "*The hydrothermal geochemistry of gold, in: Foster R. P., (ed.), gold metallogeny and exploration*", Blackie and Sons Ltd. (1991) 432 p.
- [19] Seward T. M., "*Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal solutions*", *Geochim. cosmochim. Acta* 37 (1973) 379-399.
- [20] Wilkinson J. J., "*Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits*", *Lithos* 55 (2001) 229-272.
- [21] Ohmoto H., Rye R. O., "*Isotopes of sulfur and carbon, In: Barnes, H. L. (Ed.) Geochemistry of hydrothermal ore deposits*", John Wiley and Sons, New York (1979) 509-567.
- [22] Li Y. B., Liu J. M., "*Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides*", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (2006) 1789-1795.
- [23] Rye RO, Bethke P.M, Wasserman M.D., "*The stable isotope geochemistry of acid sulfate*", *Economic Geology* 87(1992) 227-262.
- [24] Rye R.O., "*A review of stable isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems*", *Chem Geol* 215(2005) 5-36.
- [25] Seal II Robert, R., "*Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals*", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 61(2006) 633-677.
- [26] Faure G., "*Principles of Isotope Geology*", second ed. John Wiley and Sons Inc., New York, (1986) 598p.
- [27] Brownlow A. H., "*Geochemistry*", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey(1979).
- [28] Parsapoor A., Khalili M., Maghami M., Bagheri H. "*The investigation on physico-chemical conditions of sulfides and sulfates based on petrographic and sulfur - oxygen stable isotope studies from the Darreh-Zar porphyry copper*" *Geochemistry and petrology of volcanic rocks at Mahoor Cu deposit, NW Nehbandan*(in Persian)", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 2 (2012) 241-252.
- [7] Boomeri M., Biabangard H., Nakashima K., Esform M., "*Occurrence and chemistry of supergene sulfide and oxide minerals in Mahour polymetal ore deposit west of Nehbandan, (in Persian)*", *Petrology* 14(2013) 17-30.
- [8] Gourabjeri Puor A., Mobasheri M., "*Compiling Data from Geological, Mineralogical and Geophysical (IPRS) Studies on Mahour Deposit, Northwest of Deh-salm, Lut Block, (in Persian)*", *Journal of Economic geology* 7 (2016) 307-325.
- [9] Miri Beydokhti R., Karimpour M. H., Mazaheri S. A., Santos J. F., Klotzli U., "*U-Pb zircon geochronology, Sr - Nd geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Mahoor granitoid rocks (Lut Block, Eastern Iran)*", *Journal of Asian Earth Sciences* 111(2015) 192-205.
- [10] Younesi S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., Maghsoudi A., "*Investigation of geology, petrology and petrogenesis of igneous rocks from the Mahour Mining exploration area, west Dehsalm: Implication for Lut tectonomagmatic setting, (in Persian)*", *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(2016) 179-198.
- [11] Younesi S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., "*Mineralogy of Mahour Zn-Cu-(pb-Bi-Ag) deposit, west of Dehsalm: implications for genesis and mineralization type, (in Persian)*" ,*Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(2017) 295-308.
- [12] Whitney D. L., Evans B. W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", *American Mineralogist* 95 (2010) 277-279.
- [13] Pars kani Co. "*Detailed report of Mahoor prospecting area(Nehbandan city, South Khorasan province), (in persian)*", (2012).
- [14] Sasaki K., Konno H., "*Morphology of jarosite-group compounds precipitated from biologically and chemically oxidized Fe ions*", *Contribution mineral petrology* 38 (2000) 45-66.
- [15] Brown P. E., Lamb W. M., "*P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid*

- Block, Eastern Iran*". Journal of Asian Earth Sciences 41 (2011), pp. 283-296.
- [39] Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Lee, H.Y., "Zircon U/Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran". Lithos 154 (2012), 392-405.
- [40] Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., Fletcher, T. "High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan". Economic Geology 107 (2012), pp. 295-332.
- [41] Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y., Lo, C.H., "Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications". Lithos 180-181 (2013), 234-251.
- [42] Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., "The Khopik porphyry copper-gold prospect, Lut Block, Eastern Iran: geology, alteration, mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies". Ore geology Reviews 65 (2015), Part 2, Pages 522-544.
- [43] Siahcheshm, K., Calagari, A., Abedini, A., "Hydrothermal evolution in the Maher-Abad porphyry Cu-Au deposit, SW Birjand, Eastern Iran: Evidence from fluid inclusions". Ore Geology Reviews 58 (2014), pp 1-13.
- [44] Arjmandzadeh, R., Santos, J.F., "Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran". International Journal of Earth Sciences 103 (2014), Issue 1, pp 123-140.
- [45] Yang Z., Hou Z., White N.C., Chang Z., Li Z., Song Y., "Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet", Ore Geology Reviews 36 (2009) 133-159.
- [46] Lowell J. D., Guilbert J. M., "Lateral and vertical alteration- mineralization zoning In porphyry ore deposits", Economic Geology 65 (1970) 373-408.
- [47] Miri Beydokhti, R., "Mineralization, alteration, petrology and age dating of intrusive deposit, Kerman, (in Persian)", Iranian Journal of Economic geology 6 (2014) 177-197.
- [29] Taghipour N., Dorani M., "Geochemistry of Sulfur and Oxygen stable isotopes in Sulfide and Sulfate minerals at Parkam porphyry copper deposit, Shahr-e-Babak, Kerman province, (in Persian)", Jouranl of Advanced Applied Geology, 8 (2013) 61-70.
- [30] Maanijou M., Mostaghimi M., Abdollahi Riseh M., Sepahi A.A., "Systematic sulfur stable isotope and fluid inclusion studies on veinlet groups in the Sarcheshmeh porphyry copper deposit: based on new data, (in Persian)", Iranian Journal of Economic geology 4(2012) 217- 239.
- [31] Wang Y.H., Zhang F.F., Liu J.J., Yang Que, C., "Genesis of the Fuxing porphyry Cu deposit in Eastern Tianshan, China: Evidence from fluid inclusions and C-H-O-S-Pb isotope systematics", Ore Geology Reviews 79(2016) 46-61.
- [32] Peng B., Sun F., Li B., "Geochronology and geochemistry of Tianhexing porphyry Cu-Mo deposit, northeast China", Ore Geology Reviews 197(2018) 130-142.
- [33] Richards J.P., "Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation", Economic Geology 98 (2003) 1515-1533.
- [34] Cooke D.R., Hollings P., Walshe J.L., "Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls", Economic Geology 100 (2005) 801-818.
- [35] Hou Z., Cook N.J., "Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue", Ore Geology Reviews 36 (2009) 2-24.
- [36] Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L., "Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology", Ore Geology Reviews (2015). doi:10.1016/j.oregeorev.2015.03.003.
- [37] McCall, G.J.H., "The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran". J. SE Asian Earth Sci. 15 (1997), 517-531.
- [38] Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., Homam, S.M., "Sr/Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut

- [49] Gustafson L.B., "*Some major factors of porphyry copper genesis*", *Economic Geology* 73 (1978) 600–607.
- [50] Frotteir G.L., Burov E., "*The development and fracturing of plutonic apices: implications for porphyry ore deposits*", *Earth and Planetary Science Letters* 214 (2003) 341-356.
- rocks, southwest-west of Dehsalm, (in Persian)", Ph.D thesis, Ferdowsi University of Mashhad (2016) 247 p.
- [48] Sillitoe R. H, "*Porphyry Copper Systems*", *Economic Geology* 105 (2010) 3–41.