

تعیین منشأ سیالات کانه‌ساز با استفاده از مطالعه ریز کاوش الکترونی و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانسار چندفلزی ماهور (شرق بلوک لوت، ایران مرکزی)

رضوان میرزایی رایینی^۱، علی احمدی^{۱*} و حسن میرنژاد^۲
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲ دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

کانسار چندفلزی ماهور واقع در شرق بلوک لوت در رگه‌ای به طول ۳ کیلومتر و عرض ۰/۵ تا ۲ متر و در سنگ‌های اسیدی نیمه‌عمیق تشکیل شده است. از سطح به عمق مناطق فروشست (تشکیل مالاکیت، آزوریت، همتیت، گوتیت و آتاکامیت)، برین‌زاد یا سوپرژن (تشکیل بورنیت، کولیت، کالکوسیت، آنگلیزیت، گرینوکیت و هاولیت) و ژرف‌زاد یا هیپوژن (تشکیل مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت) در کانسار مشاهده می‌شوند. نتایج حاصل از آنالیز ریز کاوش الکترونی، حضور مقادیر متغیری از عناصر Cu و Fe, Zn, Cd, In, Sb, As, Ag در کانی‌های سولفیدی کانسار ماهور را نشان می‌دهد. سه کانی کمیاب گرینوکیت، هاولیت و آتاکامیت در منطقه سوپرژن و فروشست کانسار ماهور توسط آنالیز ریز کاوش الکترونی شناسایی شد. دگرسانی‌های موجود در کانسار از انواع سیلیسی، سریسیتی، پروپیلیتیک، آرژیلیک و پتاسیک هستند. مقادیر $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ برای ۸ نمونه از کانی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و بورنیت) در کانسار ماهور، بین ۰/۲ درصد تا ۴/۰۷ درصد با میانگین ۲/۹۶ درصد است. دمای برآورد شده از محاسبات ترمودینامیکی بر اساس ترکیب زوج‌های سولفیدی در حال تعادل، نشانگر دامنه تغییرات تقریبی بین ۲۱۵ تا ۳۸۰ درجه سانتیگراد است. بنابراین، چنین استنباط شده که گوگرد لازم برای تشکیل کانی‌های سولفیدی در کانسار چندفلزی ماهور توسط سیالات هیدروترمال و یا سنگ‌های آذرین منطقه تأمین شده است.

واژه‌های کلیدی: کانسار چندفلزی ماهور، دگرسانی، ایزوتوپ گوگرد، ریز کاوش الکترونی

مقدمه

(1999). هر چند کمر بند ماگمایی (ارومیه- دختر)

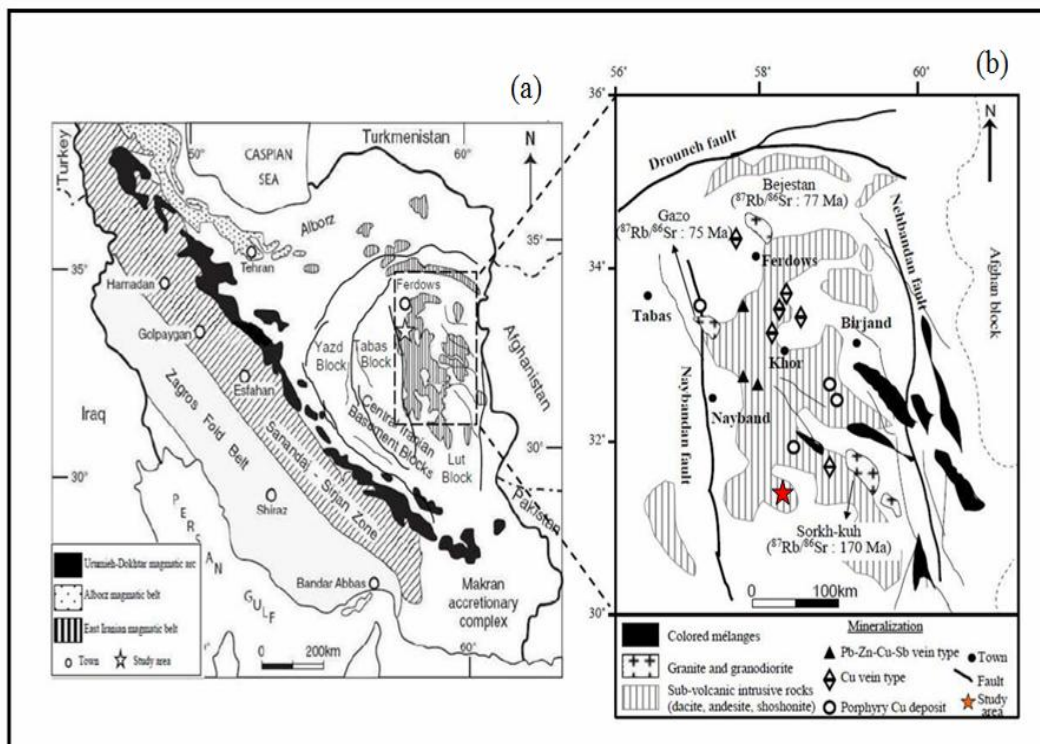
مهم‌ترین پهنه کانسار سازی مس و میزبان بزرگ‌ترین کانسارهای مس پورفیری از جمله میدوک و سرچشمه است، اما با توجه به حجم عظیم فعالیت‌های ماگمایی و

اغلب کانسارهای مهم ایران در شش منطقه ساختمانی (ارومیه- دختر، البرز غربی، کویر سبزه‌وار، سبلان، لوت و مکران) واقع شده‌اند (Khoei *et al.*,

شیب حدود ۸۰ درجه به سمت شرق انفعال افتاده است. طول رگه ۳ کیلومتر و عرض آن از ۰/۵ تا ۲ متر متغیر است. مجموعه‌ای از اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن در اثر هوازدگی بر روی سطح کانسنگ تشکیل شده و راهنمای مناسبی جهت اکتشاف کانسار به وجود آورده است. کانه‌سازی چندفلزی از عناصر مس، سرب و روی در امتداد رگه مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه کانسار ماهور اخیراً اکتشاف شده و فعالیت‌های اکتشافی بر روی این کانسار پایان نیافته است، بنابراین هدف این پژوهش، بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، شرایط دمایی و منشأ سیال کانه‌ساز است که با استفاده از شواهد کانی‌شناسی، بافت و ایزوتوپ‌های گوگرد برای اولین بار در این منطقه انجام شده است.

شرایط زمین‌ساختی خاص بلوک لوت به‌عنوان شرقی‌ترین بخش خرد قاره ایران مرکزی، می‌توان انتظار ذخایر متنوعی از کانی‌سازی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی را به‌ویژه در بخش‌های شرقی تکتونیزه آن داشت (شکل ۱). اکتشافات اخیر و مطالعات پتروولوژی پهنه‌های آتشفشانی- نفوذی بلوک لوت، این منطقه را به‌عنوان محیطی مناسب جهت کانی‌سازی اپی‌ترمال و پورفیری طلا، مس و مولیبدن معرفی کرده است (Arjmandzadeh *et al.*, 2010). محدوده اکتشافی ماهور که موضوع این نوشتار است در شرق بلوک لوت و ۱۴۵ کیلومتری غرب شهرستان نهبندان واقع شده است. بر اساس مطالعات صحرایی و حفاری‌های انجام شده در این منطقه، کانه‌سازی در امتداد یک رگه نیمه‌عمیق آپلیتی- گرانوفیری با روند شمالی- جنوبی و



شکل ۱- (a) موقعیت منطقه معدنی ماهور در مجموعه ماگمایی شرق ایران (با تغییرات از Alavi (۱۹۹۴): b) پراکندگی کانسارها و نشانه‌های معدنی چندفلزی رگه‌ای و پورفیری در کمربند ماگمایی ناحیه مرکزی لوت (با تغییرات از Jung و همکاران (۱۹۸۳))

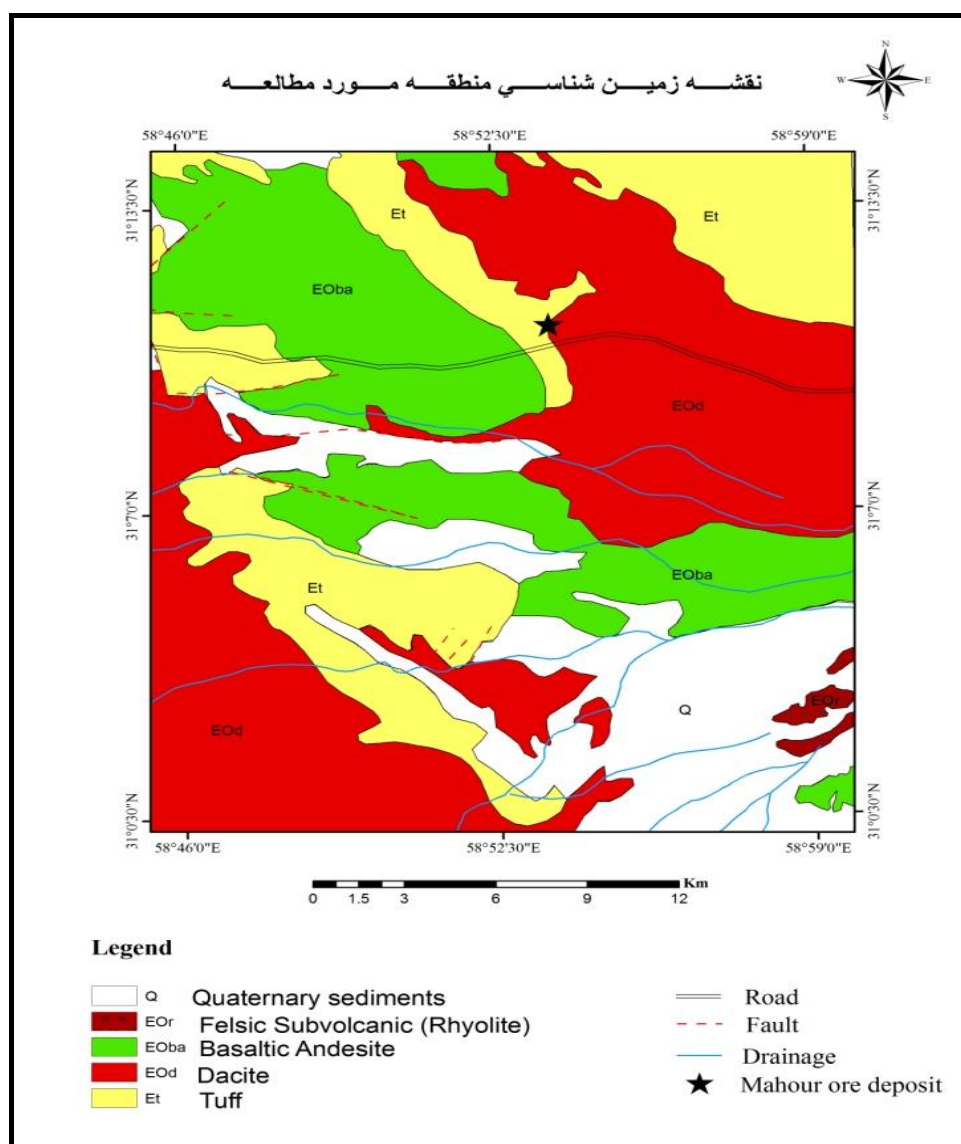
ترکیب آندزیتی- داسیتی دارند، قسمت بیشتر بلوک لوت را می‌پوشانند. واحدهای آذرین موجود در منطقه

زمین‌شناسی منطقه

سنگ‌های آتشفشانی دوران سوم که به‌طور عمده

ترکیب متوسط تا اسیدی، با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های داسیتی، آندزیتی در قسمت‌های شمالی و بخش‌هایی از مرکز محدوده دارای رخنمون محدود است. توف یاد شده عمدتاً لیتیک است و در سطح به صورت برشی شده، سیلیسی شده و پیریتی شده مشاهده می‌شود. جوان‌ترین واحد سنگی موجود در منطقه، نهشته‌های آبرفتی (Q)، شامل ماسه، سیلت و رس است که بیش‌ترین گسترش را در قسمت جنوب‌غربی محدوده دارد و سن آن در نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ چاهوک (حسینی و همکاران، ۱۳۷۱)، کوآترنر گزارش شده است (شکل ۲).

مورد مطالعه شامل سه واحد بازالت، داسیت و توف به سن ائوسن هستند که توسط رسوبات کوآترنر پوشیده شده‌اند (شکل ۲). مجموعه آتشفشانی بازالتی (EOba) شامل آندزیت‌بازالت و بازالت به‌رنگ خاکستری تیره تا سیاه در قسمت غربی محدوده گسترش دارد. واحد سنگی داسیت (EOd) دارای بافت پورفیری بوده و با داشتن رنگ خاکستری روشن در صحرا قسمت‌های وسیعی از شرق، جنوب و جنوب‌شرق محدوده را فرا گرفته که مهم‌ترین بخش کانه‌سازی در این واحد رخ داده است. واحد توف به‌رنگ سبز و خاکستری و با



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم (چاهوک) (حسینی و همکاران، ۱۳۷۱)

روش انجام پژوهش

beam) برابر ده کیلو الکترون ولت (10 Kev) و قطر باریکه برابر یک میکرون (1μ) بوده و داده‌ها به روش CITZAF (Armstrong, 1988) تصحیح شده‌اند (reduced). جریان باریکه الکترون ده نانو آمپر (10nA) و زمان شمارش (counting time) ۴۰ ثانیه بوده است. از این نقاط، تصاویر میکروسکوپ الکترونی توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی (Scanning SEM Electron Microscope) مدل JSM-6400 تهیه شده است. درستی (accuracy) آنالیزهای حاصل از ریزکاوش الکترونی که بر اساس رابطه درستی (نمونه - استاندارد/ استاندارد) و بر اساس تجزیه هم‌زمان استانداردهای معروف CHR (کرومیت)، ILM (ایلمنیت)، KKHBD (کوکونویی هورنبلند) و OR1 (فلدسپات آلکالن) به دست آمده برای عناصر مختلف (به درصد) از این قرار است: Si (۰/۳۵)، Al (۰/۳۱)، Na (۰/۴۲)، Ca (۰/۳۷)، K (۰/۴۸)، Ba (۲/۱)، Fe (۰/۲۴)، Cu (۱/۱)، Zn (۲/۴)، Cd (۱/۷)، In (۳/۲)، Ag (۴/۶)، Sb (۲/۲)، As (۴/۳)، S (۰/۳۹) و Cl (۰/۱۷).

دگرسانی‌ها

پنج نوع دگرسانی سریسیتی، آرژیلیک، سیلیسیک، پروپیلیتیک و پتاسیک به ترتیب فراوانی در منطقه مطالعاتی ماهور تشخیص داده شده است. سریسیتی شدن با جانشینی اکثر سیلیکات‌های سنگ‌ساز مانند پلاژیوکلازها و فلدسپات‌های آلکالن توسط سریسیت و کوارتز به همراه مقادیر متغیری از پیریت (۲ تا ۴ درصد حجم سنگ) مشخص می‌شود. در این نوع دگرسانی، پلاژیوکلاز و فلدسپات آلکالن موجود در سنگ میزبان به سریسیت و کانی‌های کربناته تبدیل شده‌اند. دگرسانی آرژیلیک با تبدیل پلاژیوکلاز به کائولینیت در آندزیت‌های منطقه تشخیص داده می‌شود. سیلیسی شدن به طور گسترده و غالباً به صورت انتشاری سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده است که در این فرآیند

بررسی‌های ایزوتوپی گوگرد بر روی ۸ نمونه از کانی‌های سولفیدی در آزمایشگاه تحقیقات ایزوتوپی Hatch دانشگاه اتاوا انجام شد. نمونه‌های ارسالی توسط طیف‌سنج جرمی Finnigan-MAT 252 تجزیه شدند. در این روش، پودر کانی‌های سولفیدی به همراه تقریباً دو برابر مقدار اکسید تنگستن (WO_3) در درون کپسول‌های قلع‌اندود ریخته و سپس تا ۱۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شده است. برای تمام نمونه‌های یاد شده نسبت ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}S$) بر حسب قسمت در هزار (%) نسبت به استاندارد مرجع تروپلیت (FeS) شخانه آهنی کانون دیابلو (CDT) محاسبه شده است. خطای اندازه‌گیری توسط دستگاه برابر با ± 0.02 درصد است. از نمونه‌های اسفالریت موجود در مغزه‌های حفاری نیز به منظور مطالعه میان‌بارهای سیال تعداد سه عدد مقطع دو بر صیقل تهیه شد و ۳۸ ادخال در شرکت مطالعات و پژوهش آذین زمین‌پویا توسط میکروسکوپ تحقیقاتی Linkham مدل TMS 94 با قابلیت اندازه‌گیری محدوده دمایی ۱۹۶ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و دقت در دماهای مرجع استاندارد، ± 0.2 درجه سانتیگراد در $56/6$ - درجه سانتیگراد (نقطه سه‌گانه CO_2)، ± 0.1 درجه سانتیگراد در صفر درجه سانتیگراد (نقطه ذوب یخ)، ± 0.2 درجه سانتیگراد در $374/1$ درجه سانتیگراد (همگن‌شدگی بحرانی H_2O)، و ± 0.9 درجه سانتیگراد در 573 درجه سانتیگراد (تبدیل کوارتز آلفا به بتا) بوده است. تجزیه کانی‌ها بر روی مقاطع نازک صیقلی تهیه شده از کانسار چندفلزی ماهور در دانشگاه نیوبرانزویک کانادا، توسط یک دستگاه ریزکاوش الکترونی چهار اسپکترومتری JEOL مدل JXA-733 (سوپر پروب) به روش اسپکترومتری طول موج بازیافتی (Wavelength Dispersive Spectrometry) انجام شده است. ولتاژ شتاب‌دهنده باریکه الکترون (electron

شود، تنها مربوط به برخی از رگچه‌هاست. در برخی نقاط، این کانی به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، شامل هماتیت و گوتیت تبدیل شده است. کالکوپیریت در مقاطع، فاقد شکل بلورین مشخص است.

Minerals	Decreasing age		
	Stage	Hypogene	Supergene
Pyrite	██████████		
Chalcopyrite	██████████		
Galena	██████████		
Sphalerite	██████████		
Magnetite	██████████		
Covellite		██████████	
Bornite		██████████	
Chalcoite		██████████	
Hematite			██████████
Goethite			██████████
Anglesite		██████████	
Hawleyite Or Greenockite		██████████	
Limonite			██████████
Azurite			██████████
Malachite			██████████
Atacamite			██████████
Quartz	██████████		
Calcite	██████████		

شکل ۳- توالی پاراژنزی کانسار چندفلزی ماهور

دگرسانی کالکوپیریت و حمل مس توسط محلول‌های فرورو، مؤثرترین عامل در تأمین کانی‌های ثانویه مس مانند آزوریت و مالاکیت بوده است. کالکوپیریت در بخش هیپوژن کانسار، به‌همراه سایر کانی‌ها مانند پیریت، گالن و اسفالریت دیده می‌شود در حالی که در زون سوپرژن، بورنیت و کوولیت به‌صورت یک حلقه واکنشی اطراف کالکوپیریت را احاطه کرده‌اند (شکل ۴- b). گالن در زیر میکروسکوپ با رنگ سفید و گاهی با تهرنگ صورتی شناخته می‌شود. از ویژگی‌های خاص این کانی وجود رخ‌های مثلثی‌شکل و تجزیه‌شدگی آن به آنگلیت در امتداد سطوح رخ است (شکل‌های ۴- c و ۵- a).

سیلیس به‌صورت دانه‌ریز فضای بین کانی‌ها را پر کرده است. نوع دیگر سیلیسی شدن در سنگ‌ها به‌صورت رگچه‌ای است که رگه‌ها و رگچه‌های سیلیس زمینه سنگ را قطع کرده‌اند. مهم‌ترین کانی‌های دگرسانی پروپیلیتیک، آلبیت و اپیدوت هستند که در آندزیت‌های منطقه مشاهده می‌شوند. دگرسانی پتاسیک نسبت به دگرسانی‌های دیگر از گسترش کمتری برخوردار است و کانی‌های شاخص این نوع دگرسانی در کانسار چندفلزی ماهور، فلدسپات پتاسیم‌دار و بیوتیت ثانویه است.

کانی‌شناسی رگه و توالی پاراژنزی

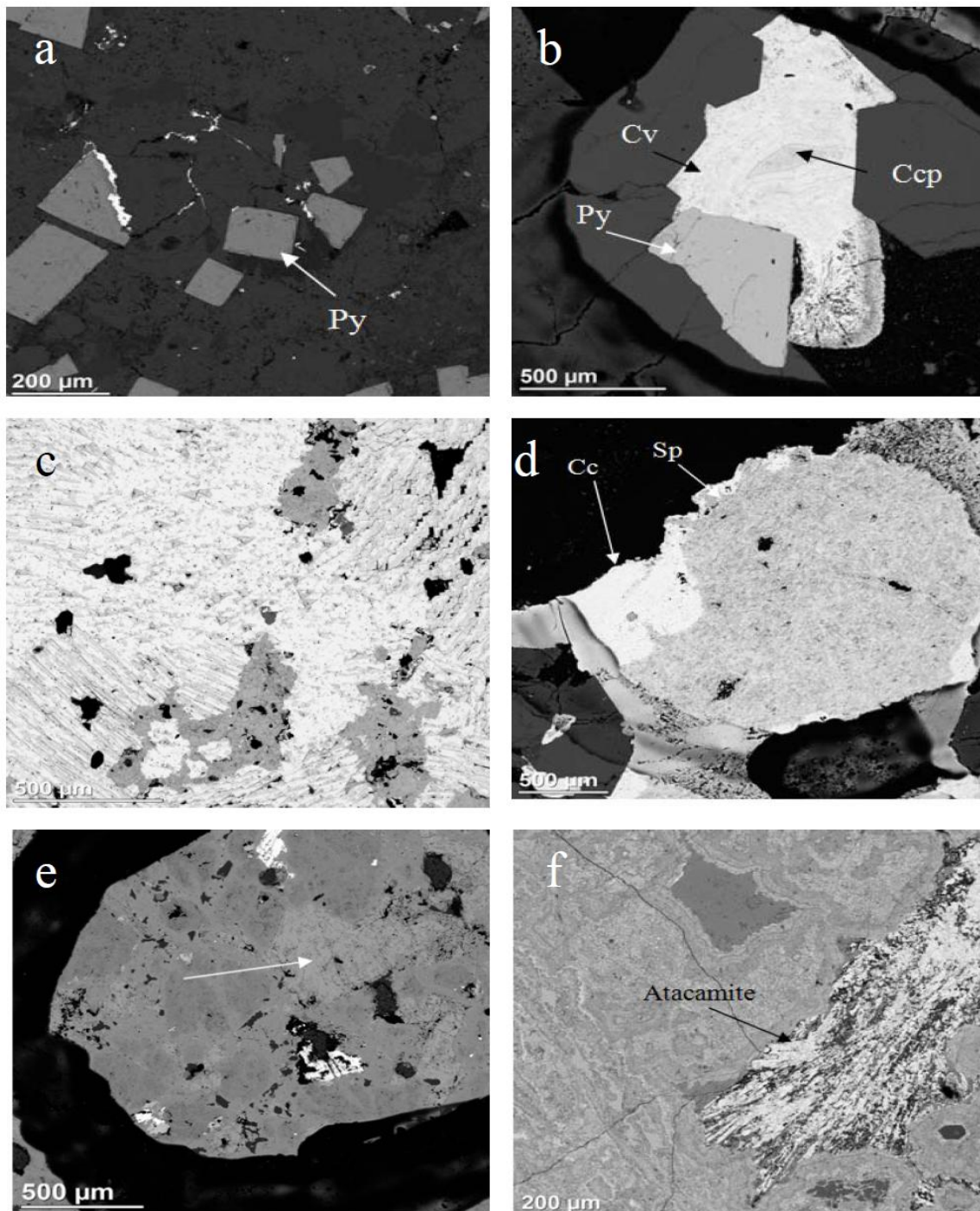
در محدوده اطراف کانسار، دایک‌ها و توده‌های کوچک با ترکیب گرانیته به فراوانی رخنمون دارند. بافت این سنگ‌ها آپلیتی و پورفیری است. به‌نظر می‌رسد که این دایک‌ها، بخش نیمه‌عمیق یک توده نفوذی بوده که به دلایل مورفولوژی از دید پنهان مانده است. دایکی که کانسار ماهور در آن تشکیل شده به این نوع از سنگ‌ها تعلق دارد. این دایک در رده‌بندی IUGS از Le Maitre (۲۰۰۲) یک گرانیته فلدسپات آلکالن نام است که دارای بافت آپلیتی و گاه گرانوفیری بوده و لوکوکرات است. این سنگ اساساً از ارتوکلاز (An0.1: Ab4.3: Or94.8) و آلبیت (Or1.4: Ab96.9: An1.8) تشکیل شده و کانی‌های فلزی به فراوانی در بعضی نمونه‌ها پراکنده‌اند.

از سطح به عمق، سه منطقه متمایز فروشت (شامل مالاکیت، آزوریت، هماتیت، گوتیت و آتاکامیت)، برین‌زاد یا سوپرژن (شامل بورنیت، کوولیت، کالکوسیت، آنگلیت، گرینوکیت و هاولیت)، و ژرف‌زاد یا هیپوژن (شامل مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت) مشاهده شده است (شکل ۳).

پیریت، فراوان‌ترین کانی سولفیدی در کانسار چندفلزی ماهور، به‌صورت پراکنده در سنگ میزبان حضور دارد (شکل ۴- a) و اگر به شکل مجتمع مشاهده

۳/۸ درصد آهن، ۶۲/۸۱ درصد روی، ۳۳/۵۷ درصد گوگرد، ۰/۳۸ درصد کادمیوم و ۰/۵۹ درصد ایندیوم است (جدول ۱).

متوسط ترکیب شیمیایی کانی‌ها که توسط ریزکاوش الکترونی اندازه‌گیری شده‌اند در جدول ۱ آمده است. کانی اسفالریت (شکل ۴-d)، حاوی



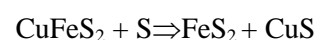
شکل ۴- تصاویر حاصل از الکترون برگشتی (BSE) از کانه‌های کانسار ماهور توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM)؛ (a) بلورهای شکل‌دار پیریت (Py)، (b) جانشینی کالکوپیریت (Ccp) توسط کوولیت به همراه پیریت (Py)، (c) تجزیه گالن (بخش روشن) در امتداد رخ‌ها و تبدیل آن به آنگلیزیت (قسمت‌های خاکستری رنگ)، (d) کالکوسیت (Cc) و اسفالریت (Sp)، (e) سولفید کادمیوم (گرینوکیت)، (f) آتاکامیت رشته‌ای؛ علائم اختصاری نام کانی‌ها از Kretz (۱۹۸۳) است.

جدول ۱- درصد داده‌های آنالیز نقطه‌ای کانی‌های مختلف (n: تعداد نقاط آنالیز شده و n.d: مقادیر ثبت نشده)

Elements	کولیت (CuS) (n=6)	اسفالریت (ZnS) (n=1)	کالکوپیریت (CuFeS ₂) (n=2)	کالکوسیت (Cu ₂ S) (n=1)	گرینوکیت یا هاولثیت (CdS) (n=2)	آتاکامیت (Cu ₂ Cl(OH) ₃) (n=3)
Cu	59.61	n.d	32.65	78.33	2.59	n.d
Fe	1.05	3.8	32.74	1.56	11.35	n.d
Ag	0.54	n.d	n.d	0.6	n.d	n.d
Sb	2.79	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
As	1.32	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Zn	3.67	62.81	n.d	n.d	7.52	n.d
Cd	0.27	0.38	n.d	n.d	32.59	n.d
In	n.d	0.59	n.d	n.d	n.d	n.d
S	30.85	33.57	35.3	20.43	46.44	n.d
FeO	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	17.94
ClO	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.85
CuO	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	55.31
Total	100.1	101.15	100.69	100.92	100.49	74.1

(شکل ۵- c). مطالعه ریز کاوش الکترونی، وجود سه کانی کمیاب گرینوکیت، هاولثیت و آتاکامیت را در منطقه سوپرژن و فروشست کانسار ماهور نشان می‌دهد (جدول ۱). هاولثیت (سولفید کادمیم) یک کانی نادر از خانواده اسفالریت است که پیش از این در کانسار ماهور دیده نشده است. شباهت بسیار زیاد این کانی با گرینوکیت تشخیص آن دو را از یکدیگر دشوار ساخته است. مقادیر بسیار کم این کانی در کانسار ماهور موجب شد تا تنها در مطالعات انجام شده توسط ریز کاوش الکترونی شناسایی شود. این کانی در کانسارهایی که به صورت تجمعی یافت می‌شود، رنگ زرد روشن دارد. این کانی عمدتاً در اثر نفوذ آب‌های جوی رسوب می‌کند. کانی گرینوکیت از خانواده ورتزیت بوده و اغلب با دیگر کانی‌های سولفیدی از قبیل اسفالریت و گالن یافت می‌شود (شکل ۴- e). فرمول شیمیایی آن مانند هاولثیت بوده اما سیستم تبلور این دو کانی، متفاوت است. هاولثیت دارای سیستم کوبیک و گرینوکیت در سیستم هگزاگونال تبلور می‌یابد. کانی گرینوکیت نیز در کانسارهایی که به صورت تجمعی یافت می‌شود به رنگ‌های زرد عسلی تا قرمز و قهوه‌ای مشخص می‌شود. گرینوکیت و هاولثیت علاوه بر کادمیم و گوگرد، عناصر دیگری همچون مس (۲/۵۹ درصد)، آهن (۱۱/۳۵ درصد) و روی (۷/۵۲ درصد) را در ساختار خود جای داده‌اند. از دیگر کانی‌های کمیاب در منطقه فروشست

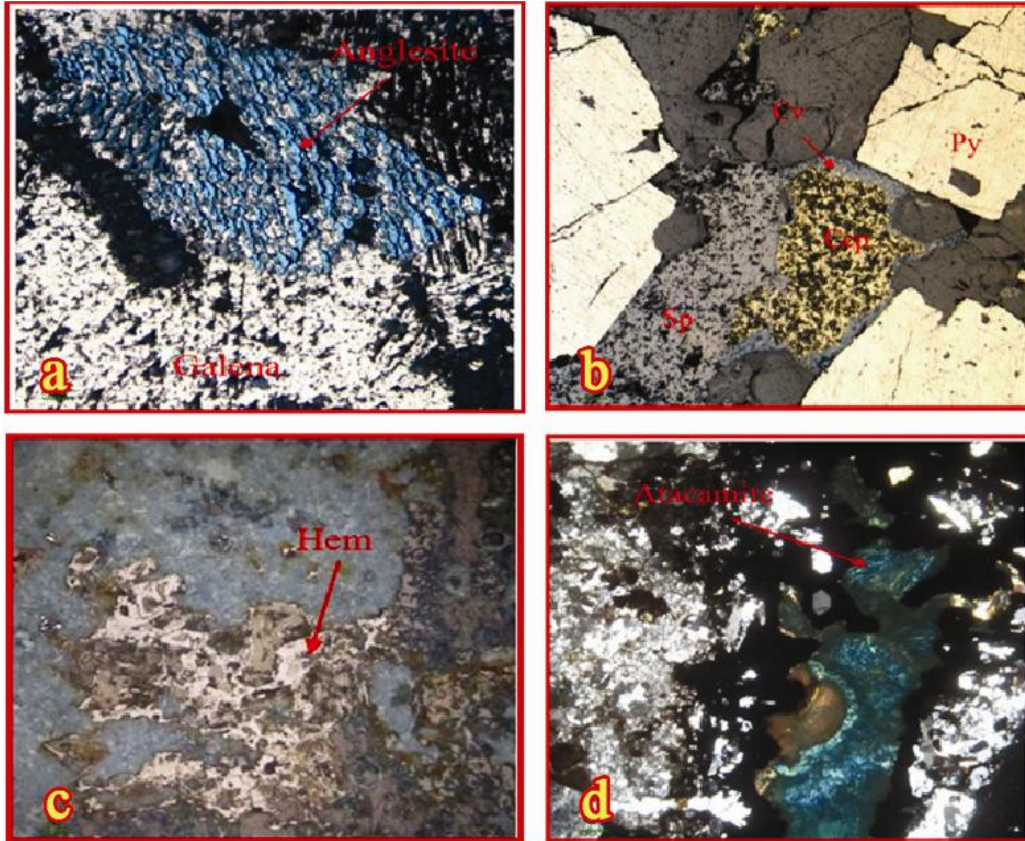
به نظر می‌رسد تشکیل اسفالریت در منطقه در دامی بالا انجام شده که وجود مقادیر بالای Fe در ترکیب شیمیایی آن، شاهدهی بر این ادعاست (Ramdohr, 1980). کالکوسیت موجود در کانسار چندفلزی ماهور در زون برین‌زاد و به صورت ثانویه تشکیل شده است (شکل ۵- d). در فرمول ساختاری این کانی (جدول ۱) مقادیر متغیری از عناصر مس (۷۸/۳۳ درصد)، آهن (۱/۵۶ درصد)، نقره (۰/۶ درصد) و گوگرد (۲۰/۴۳ درصد) وجود دارد. کانی‌های کولیت و بورنیت در منطقه برین‌زاد تشکیل شده‌اند. کانی کولیت به رنگ آبی نفتی دیده می‌شود و چندرنگی قوی و ناهمسانگردی بالا دارد (شکل ۵- b). تشکیل کولیت در کانسار چندفلزی ماهور را می‌توان در نتیجه اضافه‌شدن گوگرد به کالکوپیریت و تشکیل پیریت و کولیت دانست:



این کانی به طور متوسط ۵۹/۶۱ درصد مس، ۱/۰۵ درصد آهن، ۰/۵۴ درصد نقره، ۲/۷۹ درصد آنتیموان، ۱/۳۲ درصد آرسنیک، ۳/۶۷ درصد روی، ۰/۲۷ درصد کادمیم و ۳۰/۸۵ درصد گوگرد دارد (جدول ۱). مگنتیت در نمونه‌های مطالعه‌شده از فراوانی اندکی برخوردار است. این کانی در برخی مقاطع به صورت ادخال درون کانی‌های پیریت و گاهی نیز به صورت افشان در متن سنگ حضور دارد که تحت تأثیر شرایط اکسیداسیون به هماتیت و گوتیت تبدیل شده است

دانه‌ای بودن آن است. آتاکامیت حاوی ۱۷/۹۴ درصد اکسید آهن، ۰/۸۵ درصد اکسید کلسیم و ۵۵/۳۱ درصد اکسید مس است (جدول ۱).

کانسار چندفلزی ماهور، آتاکامیت است (شکل‌های ۴-۵-۶). این کانی سبزرنگ بوده و تشخیص آن از مالاکیت دشوار است، تنها تفاوت آن با مالاکیت حالت



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ پلاریزان از کانی‌های سولفیدی موجود در کانسار ماهور؛ (a) تجزیه گالن در امتداد سطوح رخ و تبدیل آن به آنگلیزیت (Anglesite)، (b) جایگزینی کالکوپیریت (Ccp) توسط کوولیت (Cv) به همراه پیریت‌های شکل دار (Py) و اسفالریت (Sp)، (c) هماتیت (Hem)، (d) آتاکامیت رشته‌ای، (نور انعکاسی)، قطر میدان دید سه میلی‌متر است. علائم اختصاری مانند شکل ۴

سیالات درگیر

درجه‌سانتیگراد متغیر بوده و دمای ذوب آخرین قطعه یخ ثبت شده (Tmi) ۸- تا ۲۰- درجه‌سانتیگراد است. با توجه به شوری محاسبه شده با رابطه Hall و همکاران (۱۹۸۸) درصد نمک طعام بین ۱۱/۷ تا ۲۳ و به‌طور متوسط ۱۷ درصد وزنی معادل NaCl به‌دست آمد. در نمونه‌های مطالعه‌شده، درجه‌حرارت همگن‌سازی سیالات درگیر دو فازی با تبدیل بخار به مایع انجام شده است. دمای همگن‌شدن نمونه‌ها (Th) از ۱۹۴ تا ۲۹۲ درجه‌سانتیگراد متغیر بوده و متوسط دمای همگن‌شدن ۲۵۳ درجه‌سانتیگراد است. با توجه به دمای همگن‌شدگی سیال و شوری به‌دست آمده، چگالی

به‌منظور تعیین ویژگی‌های سیال کانه‌ساز، آزمایشات میکروترمومتری بر روی سیالات درگیر اولیه و ثانویه کاذب موجود در کانی اسفالریت کانسار چندفلزی ماهور انجام شد. اغلب این میان‌بارها دارای شکل‌های زاویه‌دار، بیضوی، استوانه‌ای، دوکی و بی‌شکل با اندازه متوسط بین ۱۰ تا ۵۰ میکرون بوده و دارای درجه پرشدگی بالایی هستند و هیچ‌گونه فاز جامد در این نمونه‌ها وجود ندارد (میرزایی‌راینی، ۱۳۹۰). بر اساس مطالعه سیالات درگیر اولیه و ثانویه کاذب، دمای یوتکتیک سیالات درگیر از ۳۲- تا ۵۹-

±۲ درصد (Ohmoto and Rye, 1979; Faure, 1986) و $\delta^{34}\text{S}$ سنگ‌های آذرین -۲ تا +۱۰ درصد (Brownlow, 1979) گزارش شده‌اند، در نتیجه گوگرد لازم برای تشکیل کانی‌های سولفیدی در کانسار چندفلزی ماهور از منشأ سیالات هیدروترمال و یا سنگ‌های آذرین منطقه تأمین شده است.

دماسنجی سیال کانه‌ساز

دمای سیال کانه‌ساز در کانسار ماهور به کمک نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در زوج گالن-اسفالریت و پیریت-کالکوپیریت تعیین شد. با توجه به مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانی‌های اسفالریت (۳/۲۶ درصد) و گالن (۰/۲ درصد) در حال تعادل، مقدار فاکتور تفریق (α) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{\text{sphalerite-galena}} = \delta_{\text{sphalerite}} - \delta_{\text{galena}} \sim 1000 \ln \alpha_{\text{sphalerite-galena}}$$

$$\Delta_{\text{sphalerite-galena}} = 3/26 - 0/2 = 3/06$$

در نتیجه:

$$1000 \ln \alpha_{\text{sphalerite-galena}} = 3/06$$

اکنون به کمک معادله تفکیک ایزوتوپی اسفالریت-گالن (Ohmoto and Rye, 1979)، دمای سیال کانه‌ساز محاسبه می‌شود:

$$1000 \ln \alpha = 0.73 (10^6/T^2)$$

$$3/06 = 0.73 (10^6/T^2)$$

$$T^2 = 238562/0915$$

$$T = 488/428^\circ\text{K}; 215/278^\circ\text{C}$$

به همین ترتیب برای زوج پیریت-کالکوپیریت نیز بر اساس معادله زیر (Ohmoto and Rye, 1979)، دمای مربوطه چنین محاسبه می‌شود:

$$1000 \ln \alpha = 0.45 (10^6/T^2)$$

دمای به‌دست آمده از زوج سولفیدی پیریت-کالکوپیریت ۳۷۶/۳۱ درجه سانتیگراد است. نتایج حاصل گویای دامنه تغییرات دما از ۲۱۵ تا ۳۸۰ درجه سانتیگراد است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که

متوسط بین ۰/۸۵ تا ۱/۰۵ به‌دست آمد (میرزایی‌راینی، ۱۳۹۰).

با در نظر گرفتن توالی پاراژنزی کانی‌سازی و تغییرات سیستماتیک دمای همگن شدگی (Th) و دمای ذوب یخ (Tmi) در منطقه ماهور، روند رقیق‌شدگی برای سیال به ثبت می‌رسد که بیانگر آمیختگی یک سیال داغ و شور با یک سیال رقیق‌تر و سردتر است (میرزایی‌راینی، ۱۳۹۰).

ژئوشیمی ایزوتوپی گوگرد

اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و بورنیت کانسار ماهور نشان می‌دهند که $\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Sph}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Ccp}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Bn}}$ با توجه به غنی‌شدگی ایزوتوپ سبک‌تر در طول تکامل سیستم ایزوتوپی و جایگزینی بورنیت به جای کالکوپیریت، چنین نتیجه می‌شود که بورنیت حاوی مقادیر بیش‌تری از ^{32}S است و بنابراین طبیعی است که نسبت $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ در این کانی نسبت به سایر کانی‌های سولفیدی کمتر است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ برای کانی‌های سولفیدی در کانسار ماهور بین ۰/۲ درصد تا ۴/۰۷ درصد با میانگین ۲/۹۶ درصد است. محدوده $\delta^{34}\text{S}$ پیریت ۳/۶۸ درصد تا ۴/۰۷ درصد است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کالکوپیریت ۲/۹۶ درصد، اسفالریت ۳/۲۶ درصد، بورنیت ۱/۷۹ درصد و گالن ۰/۲ درصد است (جدول ۲).

جدول ۲- مقادیر تغییرات ایزوتوپ گوگرد در نمونه‌های سولفیدی کانسار چندفلزی ماهور

Sample	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{cpr}}$ (‰)
W2-36	Pyrite	4.07+
W2-110	Pyrite	+4.03
W2-110	Chalcopyrite	+2.96
W2-110	Bornite	+1.79
W3-58	Pyrite	+3.68
W3-58	Sphalerite	+3.26
W4-51	Pyrite	+3.69
MD1	Galena	+0.2

از آنجا که مقدار $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدهای ماگمایی حدود

است. در نتیجه مقدار $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$1000 \ln \alpha_{\text{Galena} - \text{H}_2\text{S}} = -0.640 (10^6/T^2)$$

با قرار دادن مقدار $\delta^{34}\text{S}$ گالن (۰/۲) و دمای همگن‌شدگی در معادله بالا، مقدار $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$ سیال ۲/۵۱ درصد تخمین زده می‌شود.

به همین ترتیب مقدار $\delta^{34}\text{S}$ اسفالریت (۳/۲۶) و دمای همگن‌شدگی را در معادله زیر قرار داده که میزان $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$ سیال ۲/۹۰ به دست می‌آید:

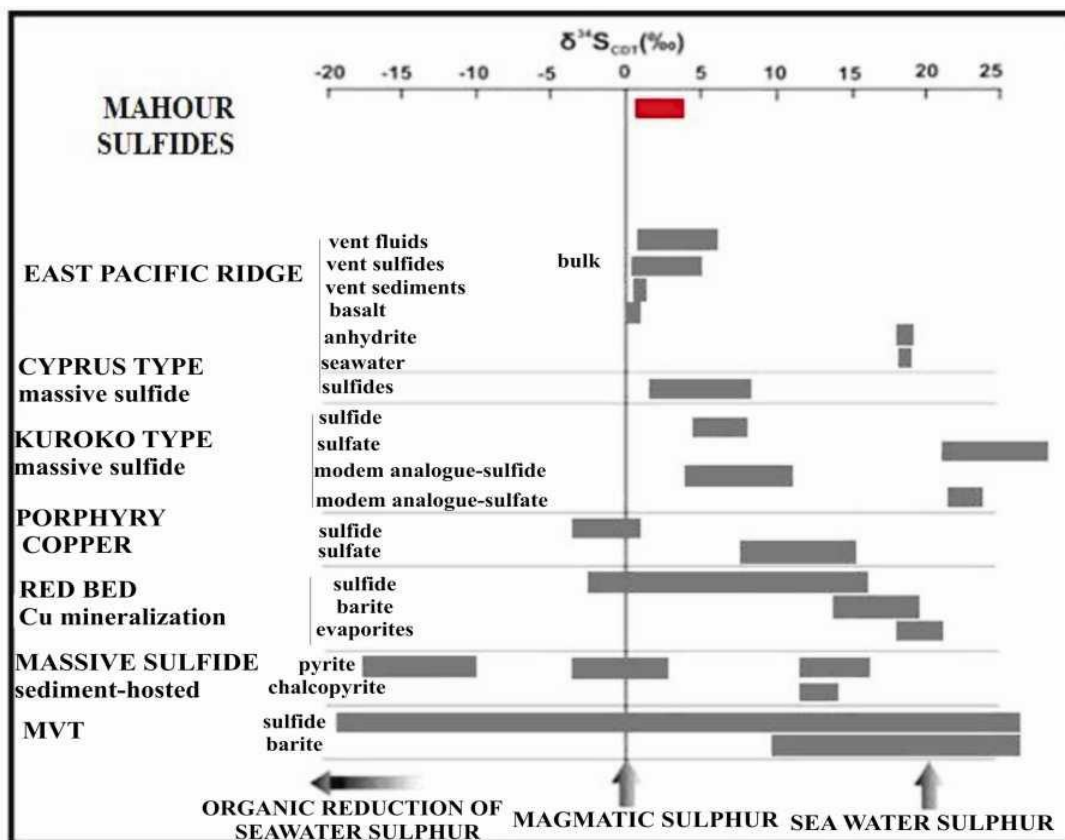
$$1000 \ln \alpha_{\text{Sphalerite} - \text{H}_2\text{S}} = 0/1 (10^6/T^2)$$

با استفاده از این روش میزان $\delta^{34}\text{S}$ سیال کانه‌ساز ۲/۵۱ تا ۲/۹۰ تخمین زده می‌شود که نشانگر ماگمایی بودن منشأ سیال کانه‌ساز است (شکل ۶).

دمای تشکیل کانسار نسبتاً پایین است و دمای اندازه‌گیری شده توسط سیالات درگیر (میرزایی‌راینی، ۱۳۹۰) با دماسنجی ایزوتوپی‌های گوگرد به‌طور قابل قبولی در تطابق است.

تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد سیال کانه‌ساز

جهت تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد سیال کانه‌ساز در کانسار ماهور، از ترمومتری سیالات درگیر استفاده شده است. با توجه به میانگین دمای همگن‌شدگی سیالات درگیر ($\text{Th}_{\text{average}} = 525.95^\circ\text{K}$) (میرزایی‌راینی، ۱۳۹۰) و قرار دادن این مقدار و میزان $\delta^{34}\text{S}$ کانی مورد نظر در معادلات تفکیک ایزوتوپی (Ohmoto and Rye, 1979)، نسبت ایزوتوپی سیال کانه‌ساز تخمین زده شده



شکل ۶- تغییرات مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی (Rollinson, 1993)، در مقایسه با کانسار چندفلزی ماهور

در این سنگ‌ها به صورت یک رگه با روند تقریبی شمالی- جنوبی رخ داده است. از سطح به عمق، مناطق فروشست (تشکیل مالاکیت، آزوریت،

نتیجه‌گیری

سنگ میزبان اصلی کانه‌سازی در کانسار ماهور سنگ‌های اسیدی نیمه‌عمیق هستند. کانی‌سازی

۲/۹۶ در هزار است. این نسبت در کانی‌های مختلف تفاوت اندکی را نشان می‌دهد به طوری که بیش‌ترین مقدار $\delta^{34}\text{S}$ مربوط به کانی پیریت و کم‌ترین آن مربوط به کانی گالن است. با استفاده از ترمومتری سیالات درگیر، میزان $\delta^{34}\text{S}$ سیال کانه‌ساز ۲/۵۱ تا ۲/۹۰ تخمین زده می‌شود. دمای برآورد شده از زوج‌های سولفیدی در حال تعادل نشان داده است که این کانسار در دمای تقریبی بین ۲۱۵ تا ۳۸۰ درجه سانتیگراد تشکیل شده است. با توجه به داده‌های ژئوشیمی ایزوتوپی که مطالعات سیالات درگیر نیز آن را تأیید می‌کند و با در نظر گرفتن تمام شواهد صحرایی و آزمایشگاهی شامل ترکیب سنگ میزبان، منطقه‌های دگرسانی، عناصر فلزی اصلی مانند مس، سرب و روی و عدم حضور کانی‌های حرارت بالا مانند گارنت، تورمالین، توپاز و غیره کانسار چندفلزی ماهور در رده کانسارهای اپی‌ترمال نوع رگه‌ای تا مزوترمال قرار می‌گیرد و گوگرد لازم برای تشکیل کانی‌های سولفیدی در کانسار چندفلزی ماهور از منشأ سیالات هیدروترمال و یا سنگ‌های آذرین منطقه تأمین شده است.

هماتیت، گوتیت و آتاکامیت)، برین‌زاد یا سوپرزن (تشکیل بورنیت، کوولیت، کالکوسیت، آنگلیت، گرینوکیت و هاولئیت) و ژرف‌زاد یا هیپوژن (تشکیل مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت) در کانسار مشاهده می‌شوند. دگرسانی‌های موجود در کانسار، سیلیسی، سریسیتی، پروپیلیتیک، آرژیلیک و پتاسیک است. مطالعه ریز کاوش الکترونی در کانسار چندفلزی ماهور بیانگر مقادیر متغیری از عناصر مس، آهن، روی، گوگرد، ایندیوم، کادمیوم، نقره، آنتیموان و ارسنیک در کانی‌های سولفیدی این منطقه است. مقادیر بالای آهن موجود در اسفالریت بیانگر تشکیل این کانی در دمای بالا است. به‌علاوه وجود سه کانی کمیاب گرینوکیت، هاولئیت و آتاکامیت در منطقه سوپرزن و فروشست کانسار ماهور نیز توسط مطالعات ریز کاوش الکترونی شناسایی شد. گرینوکیت و هاولئیت هر دو سولفید کادمیوم هستند. گرینوکیت از خانواده ورتزیت و هاولئیت از خانواده اسفالریت است. نسبت ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}\text{S}$) کانی‌های سولفیدی کانسار چندفلزی ماهور دارای دامنه محدودی از ۰/۲ تا ۴/۰۷ با میانگین

منابع

- حسینی، ض.، افشاریان‌زاده، م. و چایچی، ز. (۱۳۷۱) نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم (چاهوک). سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- میرزایی‌راینی، ر. (۱۳۹۰) ژئوشیمی کانسار مس ماهور و سنگ‌های میزبان آن، شرق بلوک لوت، ایران مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران.
- Alavi, M. (1994) Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229: 211-238.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M. (2010) Two sided asymmetric subduction: new hypothesis for the tectonomagmatic and metallogenic setting of the Lut Block, Eastern Iran, 1st Conference of the Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- Armstrong, J. T. (1988) Quantitative analysis of silicate and oxide minerals: $\phi(\rho Z)$ procedures. In: Newbury, D. E. (Ed.) *Microbeam Analysis*. San Francisco Press, San Francisco, 246-293.

- Brownlow, A. H. (1979) *Geochemistry*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Faure, G. (1986) *Principles of Isotope Geology*. 2nd edition, John Wiley and Sons, New York.
- Hall, D. L., Sterner, S. M. and Bodnar, R. J. (1988) Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Economic Geology* 93: 197-202.
- Jung, D., Keller, G., Khorasani, R., Marks, K., Buman, A. and Kuren, P. (1983) Petrogenesis of Tertiary magmatic activity in Northern Lut region (East Iran). Geological Survey of Iran, Iran.
- Khoei, N., Qorbani, M. and Tajbakhsh, P. (1999) Copper deposits in Iran. Geological Survey of Iran, Iran.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Le Maitre, R. W. (2002) *Igneous rocks: a classification and glossary of terms*. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H. L. (Ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons, New York.
- Ramdohr, P. (1980) *The ore minerals and their intergrowth*. Pergamon, Oxford.
- Rollinson, H. (1993) *Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, London.

The origin of ore-forming fluids in the Mahour polymetal ore deposit, using electron microprobe data and sulfur isotopes (East of Lut block, Central Iran)

Rezvan Mirzaei Rayeni ¹, Ali Ahmadi ^{1*} and Hassan Mirnejad ²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² School of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

The Mahour polymetal deposit, located east of the Lut block, is a three-km-long and 0.5-2m wide vein formed in hypabyssal acid rocks. Downward, three leached zones (malachite, azurite, hematite, goethite and atacamite), supergene (bornite, covellite, chalcocite, anglesite, greenockite and hawleyite), and hypogene (magnetite, chalcopyrite, pyrite, galena and sphalerite) are observed in the deposit. The results of electron microprobe analyses show the presence of varying amounts of Ag, As, Sb, In, Cd, Zn, Fe and Cu, in the sulfide minerals of Mahour deposit. Three rare mineral phases, namely atacamite, greenockite and hawleyite in the leached and supergene zones, were identified by the electron microprobe analyses. The types of alteration present in the deposit are silicic, sericitic, propylitic, argillic, and potassic. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ values for eight sulfide samples (pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite and bornite) in Mahour deposit vary between 0.2 to 4.07%, with a mean value of 2.96%. Inferred temperature from thermometric calculations, based on the sulfur isotope compositions of sulfide pairs in equilibrium, indicate temperatures of 215-380 °C. Therefore, it is concluded that sulfur needed for the generation of sulfide minerals in the Mahour polymetal deposit was supplied by either ore-forming fluids or igneous rocks in the region.

Key words: Mahour polymetal deposit, Alteration, Sulfur isotope, Electron microprobe

* aahmadi@science.usb.ac.ir