

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰، از صفحه ۳۵ تا ۴۸

بررسی کانی‌سازی، دگرسانی و میانبارهای سیال ذخیره مس تخت‌گنبد (شمال‌شرق سیرجان، جنوب‌شرق ایران)

محمد صالحی تینونی^{۱*}، علی عابدینی^{۲*}، علی‌اصغر کلاگری^۳

۱- سازمان زمین‌شناسی کشور، اداره کل جنوب‌شرق کشور، کرمان، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۰، نسخه نهایی: ۹۹/۳/۱۲)

چکیده: ذخیره مس تخت‌گنبد در ۶۳ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان سیرجان، جنوب‌شرق ایران واقع است. کانی‌سازی درونزاد در این ذخیره به شکل رگه-رگچه‌ای داربستی و رگه‌های ضخیم کوارتزی رخ داده است که توسط توده میکروگرانودیوریتی الیگو-میوسن و مواد آذرآواری (به طور عمده توف با ترکیب حدوداً $L+V+S$) ایوسن میزبانی می‌شود. رگه-رگچه‌های داربستی در بردارنده سه نسل کانی‌سازی (۱) کوارتز + مگنتیت ± کالکوپیریت، (۲) کوارتز + کالکوپیریت + پیریت ± مگنتیت و (۳) کوارتز + پیریت + کالکوپیریت هستند. دگرسانی فیلیک بیشتر در سنگ‌های دیواره پیرامون رگه-رگچه‌های داربستی گسترش یافته است. کانی‌سازی برونزاد در این ذخیره با جانشینی سولفیدهای آهن دار توسط هماتیت و گوتیت مشخص می‌شود. همچنین، تشکیل ملاکیت، آزوریت و مس طبیعی در جریان تخریب سولفیدهای درونزاد آهن و مس در شرایط اکسایشی رخ داده است. بررسی میانبارهای سیال در بلورهای کوارتز موجود در رگه-رگچه‌های کوارتزی نشان داده که آنها بیشتر از نوع مایع+گاز+جامد ($L+V+S$)، مایع+گاز ($L+V$) و گاز+مایع ($V+L$) بوده و دارای دمای همگنی در گستره ۱۴۶ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۰,۳۵ تا ۵۷,۸ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند. فازهای جامد شامل هالیت، سیلیویت و کانی‌های تیره هستند. میانبارهای سیال مورد بررسی در رگه‌های کوارتزی ضخیم از نوع $L+V$ بوده و دارای دمای همگنی در گستره ۲۰۷ تا ۳۴۴ درجه سانتی‌گراد و شوری ۰,۳۵ تا ۳۹,۳ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند. بر اساس نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال، جوشش سیال‌های ماقمایی عامل مؤثر در نهشت کانی‌های کانسنگی و باطله در رگه-رگچه‌های داربستی است. همچنین سردشگی و آمیختگی سیال‌های جوی و ماقمایی علت نهشت کانی‌ها در رگه‌های ضخیم کوارتزی هستند. در کل، یافته‌های به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که روند تشکیل و تکامل سامانه گرمایی تخت‌گنبد بیشترین شیاهت را به سامانه‌های مس پورفیری دارد.

واژه‌های کلیدی: تخت‌گنبد؛ کمربند مس کرمان؛ کانی‌سازی؛ دگرسانی؛ میانبارهای سیال؛ مس پورفیری.

مقدمه

ذخیره تخت‌گنبد را در بر دارد [۳-۱] (شکل ۱). این کمربند به کمربند فلزی‌ای دهچ - ساردوئیه نیز معروف است [۶-۴]. کمان ماقمایی سنوزوئیک کرمان به طور عمده مجموعه سنگ‌های آذرین خروجی ایوسن تا الیگوسن-کوارنر و نفوذی بیشتر الیگوسن تا میوسن را شامل می‌شود [۷-۴] (شکل ۲). شکل

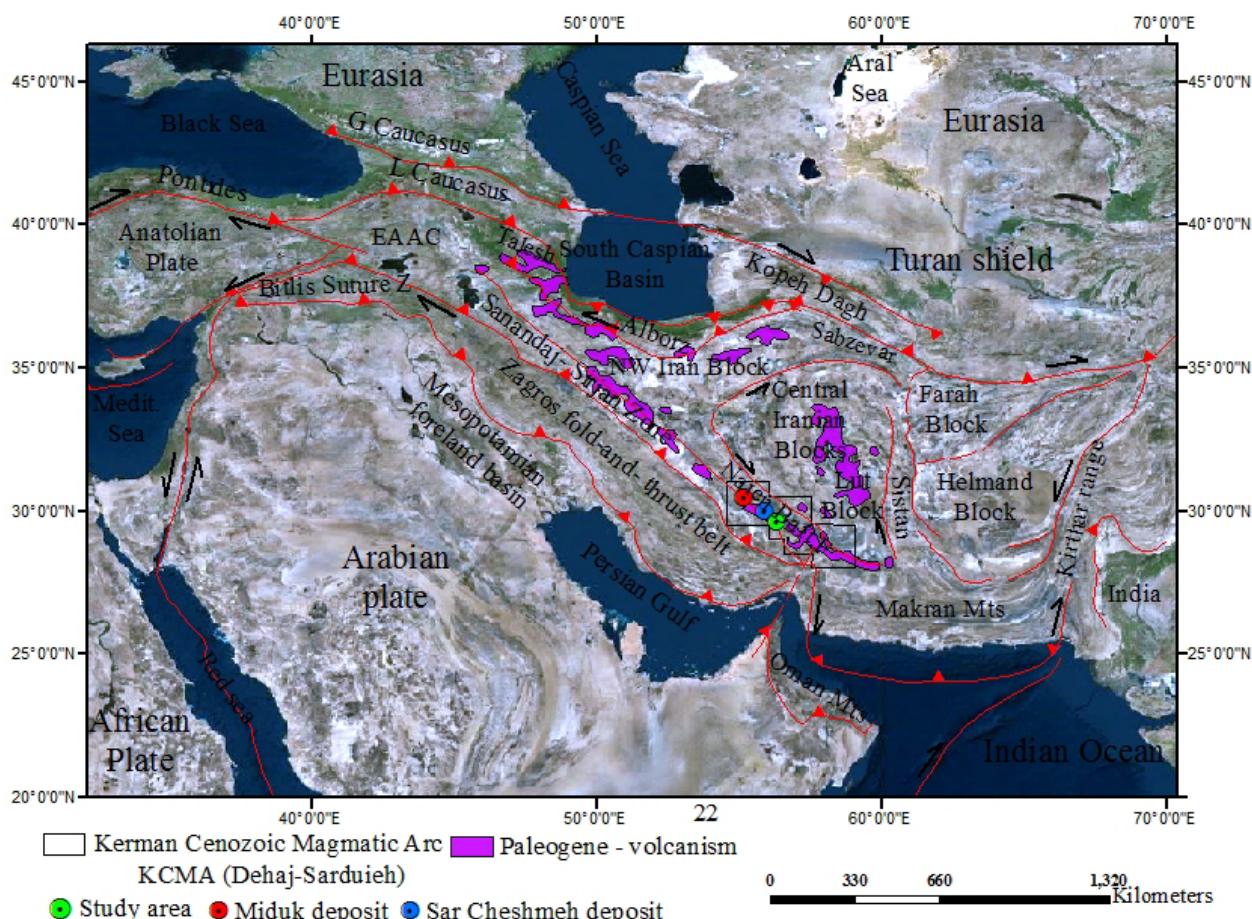
استان کرمان یکی از مناطق معدنی کشور به شمار می‌رود که غنی‌ترین بخش آن کمربند فلزی مس کرمان یا کمان ماقمایی سنوزوئیک کرمان است که ذخایر بزرگی از جمله مس پورفیری سرچشممه (رفستان) و میدوک (شهر بابک) همراه با

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴ (۳۲۷۷۶۷۰۷)، نامبر: ۰۴۴ (۳۲۹۷۲۱۳۴)، پست الکترونیکی: abedini2020@yahoo.com

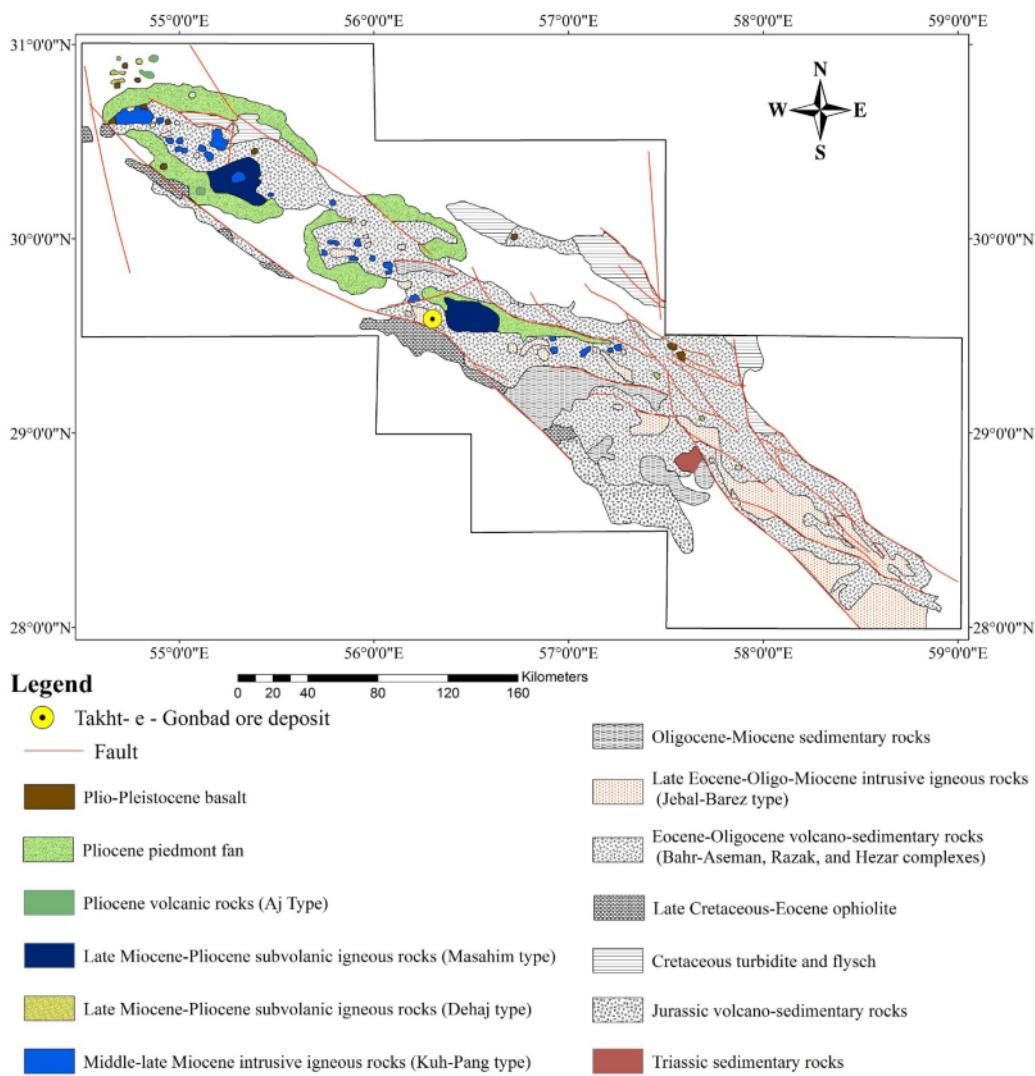
است.

کانی‌سازی مس تخت‌گنبد (با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $4^{\circ} 0' 4''$ و $59^{\circ} 13' 25''$) از ذخایر حاضر در این کمربند است (شکل‌های ۱ و ۲) که در ۶۳ کیلومتری شمال-شرق شهر سیرجان در استان کرمان واقع است. این کانی‌سازی نخستین بار توسط ندیموج [۱۱] بررسی شد. در چند سال اخیر پیجوبی تفصیلی پیرامون کانی‌سازی توسط شرکت مس تخت‌گنبد سیرجان [۱۳] انجام شده و ذخیره قطعی حدود ۵۰ میلیون تن با عیار 0.3% تا 0.5% درصد مس برای آن تعیین شده است. این ذخیره اکنون به عنوان معدن تخت‌گنبد در حال بهره‌برداری است. در این پژوهش، بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، بافت، دگرسانی و میانبارهای سیال، سازوکار نهشت کانستگ‌ها و نوع کانی‌سازی در سامانه تخت‌گنبد ارزیابی شد.

گیری این کمان ماجمایی در ارتباط با فروزانش پوسته اقیانوسی نئوتیس به زیر خرد قاره ایران مرکزی است [۹، ۸]. عمدۀ واحدهای آذرین خروجی در این کمان شامل بازالت، تراکی-بازالت، آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریوداسیت، و سنگ‌های آذرین نفوذی شامل دیوریت، کوارتزدیوریت، کوارتزمنزونیت، گرانودیوریت و گرانیت هستند [۵، ۱۰]. ظهور سنگ‌های نفوذی و سیال‌های گرمابی برآمده از آن عامل شکل-گیری ذخایر پورفیری و رگه‌ای با بیش از ۲۰۰ اثر کانی‌سازی در کمربند ماجمایی سنجوزنیک کرمان بوده است [۱۱، ۱۲]. ذخایر پورفیری موجود در ارتباط با استوک‌های گرانیتوئیدی نوع I بوده و سیال‌های مؤثر در کانی‌سازی این ذخایر دارای شوری و دمای بالا با خاستگاه ماجمایی بوده‌اند. ظهور دگرسانی‌هایی چون فیلیک در بسیاری از این ذخایر بیانگر ورود سیال‌های جوی به‌سامانه گرمابی در مراحل آخر تکامل سامانه



شکل ۱ نقشه پهنه‌های زمین‌ساختاری ایران به عنوان بخشی از کمربند کوهزادی آلب-هیمالیا و موقعیت کمربند دهچ-ساردوئیه (کمان ماجمایی سنجوزنیک کرمان، KCMA) بر محیط‌های آذرین پالاآژن، بر گرفته از مرجع [۳، ۲] با کمی تغییرات.



شکل ۲ سنگشناسی ساده کمربند ماقمایی سنوزوئیک کرمان [۱] که موقعیت ذخیره تخت گنبد در آن نشان داده است.

واحدهای رسوی کربناتی و کنگلومرایی هستند. از مهمترین سنگ‌های میزبان می‌توان به توده نفوذی میکروگرانولوپریت- داسیت پورفیری میوسن اشاره نمود که بر واحدهای خروجی اوسن اثر گذاشته است. به واسطه دگرگونی مجاورتی ناشی از این توده در بخش‌هایی، واحدهای آذرآواری (بیشتر توف) هورنفلسی شده‌اند. این توده نفوذی به احتمال بسیار عامل اصلی کانی‌سازی تخت گنبد است. سرشت نفوذی کانی‌سازی شده تخت گنبد و بسیاری از توده‌های نفوذی الیگوسن تا میوسن در منطقه معدنی چهارگنبد آهکی قلیابی نوع I بوده و به کمان آتش‌فشاری کرانه قاره‌ای ارومیه- دختر (ارومیه- بزمان) وابسته است [۱۶، ۱۷]. بر اساس بررسی‌های صحرایی، کانی‌سازی در ذخیره تخت گنبد به طور عمده از نوع رگه-

زمین‌شناسی

کانی‌سازی تخت گنبد در منطقه معدنی چهارگنبد (نقشه ۱۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد [۱۵، ۱۴]) واقع است. زمین‌شناسی ناحیه‌ای این منطقه معدنی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین، آذرآواری و حربان گدازه‌ای از نوع اشباع از سیلیس با ترکیب مافیک تا فلزیک با گرایش شبه تولئیتی- آهکی قلیابی است [۱]. این مجموعه شامل بازالت، آندزیت، تراکی آندزیت، ریوداسیت، توف و آگلومرا با میان لایه‌هایی از سنگ‌های رسوی است [۱۷، ۵، ۱۶، ۱۴].

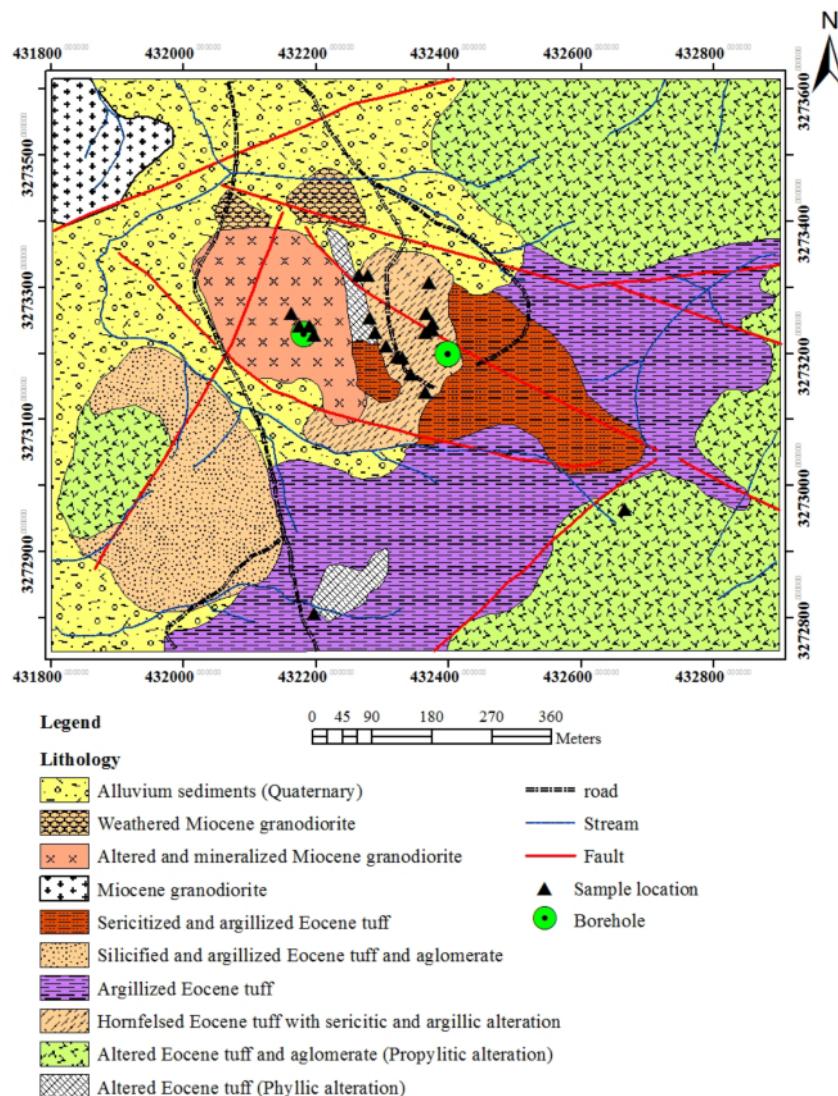
واحدهای سنگی میزبان دگرسانی و کانی‌سازی مس تخت- گنبد شامل سنگ‌های آذرآواری اوسن از جمله بلور توف آندزیت، بلور توف داسیت و توف سنگی با میان لایه‌هایی از

صحرایی، تعداد ۹۰ نمونه سنگی از رگه- رگچه‌های کانی‌سازی شده، بخش‌های دگرسانی و سنگ میزبان آنها جمع‌آوری شد. از بین آنها، تعداد ۵۰ نمونه برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری انتخاب شده و ۳۰ مقطع نازک و ۲۰ مقطع صیقلی تهیه و با میکروسکوپ نوری عبوری- بازتابی زایس مدل Axioplan2 در اداره کل سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معنی جنوب شرقی (کرمان) مطالعه گردیدند. برای بررسی دقیق دگرسانی‌های همراه با کانه‌زایی، تعداد ۱۰ نمونه با استفاده از پراش‌سنجهای پرتو ایکس (XRD) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معنی ایران (کرج) تجزیه قرار شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده‌اند.

رگچه‌ای داربستی بوده که توسط مناطق دگرسانی فیلیک (در عمق) و دگرسانی رسی- فیلیک (در مناطق سطحی) در بر گرفته شده است. رگه‌های ضخیم کوارتزی از دیگر نمودهای بسیار مشخص در منطقه کانی‌سازی و قطع کننده دگرسانی فیلیک است که به نظر می‌رسد که در مرحله بعدی کانی‌سازی نسبت به رگه- رگچه‌های کوارتزی شکل گرفته‌اند. در شکل ۳، نقشه زمین‌شناسی کانی‌سازی منطقه تخت‌گنبد نشان داده شده است.

روش بررسی

این پژوهش در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش صحرایی، پیمایش‌هایی به منظور شناسایی واحدهای سنگی و بررسی روابط آنها صورت گرفت. بر اساس بررسی‌های



شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه کانی‌سازی تخت‌گنبد، برگرفته از مرجع [۱۳] با کمی تغییرات.

جدول ۱ نتایج به دست آمده از پراش پرتو X (XRD) نمونه‌های پهنه دگرسانی ذخیره تخت گنبد. (H: هورنفلس، Po: پتاسیک، Pr: پروپیلیتیک، S: سیلیسی، Ph: فیلیک، و Ca: کربناتی شدن).

کانی	Tg-1.Pr	Tg-6.H	Tg-8.S	Tg-9.Ph	Tg-10.Ca	TH-4.Po	TH-10.Po	TH-11.Po	TL-7.Ph	TL-11.H
اورتوكلاز						×	×	×		
کوارتز	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
کلسیت		×	×	×	×					
مسکوویت				×					×	
اپیدوت	×									
ایلیت		×		×					×	
کلینوکلر										×
آلیت		کم				کم	کم	کم		کم
آناتاز				×						
کاتولینیت	×				×			×	×	
دیکیت						×				
پیریت	×									
سیدریت					×				×	
دولومیت	×				×					
آترکریت										
دیوپسید		×								×
آنذین		×								
مونت‌موریلوبونیت		×								
مگنتیت			×						×	
کالکوپیریت				×						
پیریت				×					×	×
همانیت			×		×	×	×	×		
گونیت			×				×			

فیلیک و رسی هستند. دگرسانی‌ها دارای پهنه‌بندی نمایانی هستند به طوری که دگرسانی فیلیک در مرکز سامانه و دگرسانی پروپیلیتیک در بخش لبه‌ای واقع است. دگرسانی فیلیک در بخش‌هایی در عرض دگرسانی رسی بوده است. اسکارنی شدن در فاصله دورتری نسبت به مرکز سامانه قرار دارد و در گستره دگرسانی پروپیلیتیک قابل مشاهده است.

رخداد دگرسانی فیلیک با حضور پیریت فراوان (بیش از ۱۰٪)، سریسیت و کوارتز قابل تشخیص است (شکل ۴ الف). سنگ‌های میزبان این دگرسانی شامل واحدهای آذرآواری (توف و توف سنگی) و توده نفوذی میکروگرانولوپیریت- داسیت پورفیری هستند. جانشینی سریسیت و کوارتز به جای فلدسپارها، و ترکیب آهن آزاد شده از ساختار کانی‌های تیره از جمله آمفیبول و بیوتیت با گوگرد اضافه شده به سامانه توسط سیال‌های گرمابی و تشکیل پیریت از عوامل اثرگذار در تشکیل پهنه دگرسانی فیلیک در سامانه کانی‌سازی تخت گنبد محسوب می‌شوند. به نظر می‌رسد که دگرسانی رسی همراه با دگرسانی فیلیک ناشی از محلول‌های برونزاد و تشکیل رس‌های ثانویه

برای بررسی میانبارهای سیال، تعداد ۸ نمونه مناسب از رگه‌های کوارتزی و رگه-رگچه‌های کوارتزی کانی‌سازی شده برداشت شدند. پس از تهیه مقاطع دوبر صیقل و بررسی‌های سنگنگاری آنها، ۴ مقطع مناسب برای ریزدماسنجی میانبارهای سیال انتخاب شده و پارامترهای دمایی لازم با استفاده از دستگاه سرمایش و گرمایش Likam مدل THMS600 و میکروسکوپ نوری زایس در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران اندازه‌گیری شدند. نتایج این اندازه-گیری‌ها بر اساس روش مرجع [۱۸] در جدول ۲ ارائه گردیده است. واسنجی دستگاه در مرحله گرمایش تا دمای ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد برابر با ± 0.6 با ماده استاندارد نیترات سزیم و در مرحله سرمایش تا دمای 94°C برابر با ± 0.2 با مایع استاندارد هگزان نرمال (ان هگزان) بود.

نتایج و بحث

دگرسانی

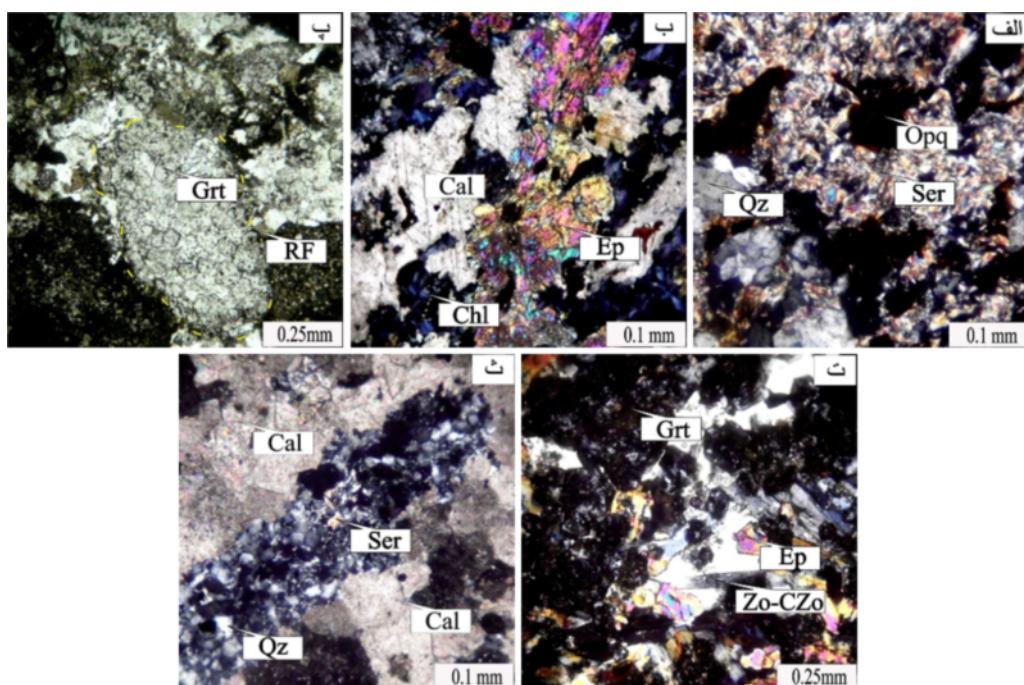
دگرسانی و کانه‌زایی متنوعی در منطقه ذخیره مس تخت گنبد رخ داده است که شامل اسکارنی شدن، دگرسانی پروپیلیتیک،

این اساس، دگرسانی رسی سامانه مس تخت‌گنبد می‌تواند دارای دو خاستگاه درونزاد و برونزاد باشد. دگرسانی پروپیلیتیک در فاصله دورتری نسبت به مرکز سامانه قرار دارد که ناشی از دگرسانی پلازیوکلаз به اپیدوت و کلسیت، هورنبلند به کلریت، اپیدوت و گاهی کلسیت است (شکل ۴ ب).

(دگرسانی سریسیت به کانی‌های رسی از جمله کائولینیت) باشد. این در حالی است که در برخی از مقاطع مورد بررسی و نتایج به دست آمده از تجزیه‌های XRD (جدول ۱)، کانی‌های رسی از جمله ایلیت در کنار پیریت اولیه قرار دارند که بیانگر اثر سیال‌های گرمابی در گسترش این پهنه دگرسانی است. بر

جدول ۲ نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های داربستی و رگه‌های ضخیم کوارتزی سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد. $\text{Th} = \text{دما} / \text{Th}$, $\text{Tm}_{(\text{NaCl})} = \text{دما} / \text{ذوب} / \text{یخ}$, $\text{Te} = \text{دما} / \text{ذوب} / \text{یخ}$ (همگذاری)، $n = \text{تعداد میانبار مورد بررسی}$. همگنی، $\text{Tm}_{(\text{NaCl Eq})} = \text{دما} / \text{ذوب} / \text{طعام}$.

نمونه	کانی	نوع میانبار		$\text{Th} (\text{°C})$	$\text{Tm}_{(\text{NaCl})} (\text{°C})$	$\text{Te} (\text{°C})$	$\text{Tm}_{\text{ie}} (\text{°C})$	شوری (wt% NaCl Eq)
FTG2-1	کوارتز از رگه‌های کوارتزی صخیم	اولیه	L-V ($n = 12$)	۲۸۰ - ۲۲۵	-	-۳۰ - ۲۱	-۲ - ۰,۳	۲,۳۹ - ۰,۵۳
FTG2-2	کوارتز از رگه‌های کوارتزی صخیم	اولیه	L-V ($n = 14$)	۳۴۴ - ۲۰۷	-	-۳۰ - ۲۱	-۰,۶ - ۰,۲	۱,۰۵ - ۰,۳۵
FTL6-1	کوارتز از رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی	اولیه	L-V-S ($n = 12$)	۳۶۴ - ۱۸۲	۳۶۲ - ۱۹۵	-	-	۴۲,۶۵ - ۳۱,۳۸
FTL6-2	کوارتز از رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی	اولیه	L-V-S ($n = 10$)	۳۸۳ - ۱۴۶	۴۸۶ - ۱۳۸	-	-	۵۷,۸ - ۲۹,۲
			L-V ($n = ۲$)	۳۴۵ - ۲۷۸	-	-	-۱,۵	۲,۵۷
			V-L ($n = ۳$)	۴۵۰ - ۴۲۰	-	-	-۲	۳,۳۹



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌ها و واحد اسکارنی‌ها ذخیره تخت‌گنبد: (الف) دگرسانی فیلیک با حضور کوارتز (Qz)، سریسیت (Ser) و کانی‌های تیره (Op). (نور قطبیده متقطع XPL)، (ب) دگرسانی پروپیلیتیک با حضور کانی‌های اپیدوت (Ep)، کلریت (Chl) و کلسیت (Cal). (نور XPL)، (پ) قطعه کربناتی اسکارنی شده با حضور گارنت (Grt) و قطعه سنگ کربناتی (RF). (نور قطبیده صفحه‌ای PPL)، (ت) اسکارنی شدن با حضور گارنت (Grt)، اپیدوت (Ep) و زئیزیت-کلینوزئیزیت (Zo-Czo). (نور XPL) و (ث) جانشینی دگرسانی فیلیک توسط دگرسانی کربناتی که در آن سریسیت (Grt) و کوارتز (Cal) (Ser)، کلسیت (Cal) (Qz) قابل تشخیص است. (نور XPL) نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۹] هستند.

کوارتز + مگنتیت ± کالکوپیریت (شکل ۵ ت)، (۲) رگه-رگچه-های کوارتز + کالکوپیریت + پیریت ± مگنتیت (شکل ۵ ث) و (۳) رگه-رگچه‌های کوارتز + پیریت + کالکوپیریت (شکل ۵ ج). افزون بر این، بر اساس بررسی‌های حسینی و همکاران [۲۲] مولبیدنیت نیز به عنوان یکی از کانی‌های شاخص در رگه-رگچه‌های کوارتزی کانی‌سازی شده در این ذخیره معرفی شده است. این در حالی است که کانی مولبیدنیت در این پژوهش دیده نشد. نسل‌های ۱، ۲ و ۳ رگه-رگچه‌های کوارتزی در کانی‌سازی تخت‌گنبد به ترتیب مشابه رگه-رگچه‌های نوع A، B و D معرفی شده در ذخایر پورفیری مس [۲۳] هستند. رگه‌های کوارتزی ضخیم (تا ۱/۵ متر) از دیگر پدیده‌های گرمابی در سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد هستند. این رگه‌ها پهنه‌های دگرسانی فیلیک و رگه-رگچه‌های کوارتزی را قطع نموده‌اند و در بخش‌هایی دربردارنده مس طبیعی همراه هستند (شکل ۶ الف). رخداد مس طبیعی به احتمال بسیار همزاد با رگه‌ها نبوده و ممکن است ناشی از فرآیندهای برونزاد بر کانی‌های سولفیدی اولیه مس از جمله کالکوپیریت باشد. حضور بافت و ساخت رگه-رگچه‌های داربستی، تشکیل رگه-رگچه‌های نوع A، B و D، تشکیل مگنتیت، کالکوپیریت و پیریت همزمان (حضور بافت درهم رشدی) با شکل‌گیری رگه-رگچه‌های کوارتزی که ویژگی‌های بارز ذخایر پورفیری هستند [۲۴-۲۵]،

در سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد دیده می‌شوند.

از دیگر نمودهای کانی‌سازی در منطقه تخت‌گنبد می‌توان به کانی‌سازی به نسبت گسترده برونزاد اشاره نمود. از جمله آثار فرآیندهای برونزاد می‌توان به جانشینی هماتیت و گوتیت به جای کانی‌های سولفیدی آهن‌دار اولیه (شکل ۶ ب)، شکل-گیری کربنات‌های مس (مالاکیت و آزوریت) و جانشینی سولفیدهای ثانویه مس مثل بورنیت به جای کالکوپیریت اشاره کرد (شکل ۶ پ). با وجود حضور گسترده کانی‌های برونزاد در رخنمون‌های سطحی پهنه‌های کانه‌سازی شده درونزاد وجود بقایای کانی‌های سولفیدی (کالکوپیریت و پیریت) اولیه به صورت جزایر احاطه شده با کانی‌های ثانویه برونزاد در منطقه کانی‌سازی برونزاد بیانگر نابالغ بودن کلاهک آهنی (گوسان) در گستره کانی‌سازی تخت‌گنبد است.

کانی‌های رسی از جمله کانولینیت از دیگر فرااوردهای هوازدگی در منطقه برونزاد تخت‌گنبد بوده که ناشی از دگرسانی به جای سریسیت و ایلیت در پهنه دگرسانی فیلیک و

از دیگر رخدادهای گرمابی در منطقه ذخیره تخت‌گنبد می‌توان به اسکارنی‌شدن (از نوع اسکارن بیرونی) اشاره کرد. به علت ضخامت کم لایه‌های کربناتی (با سن ائوسن)، گسترش توده‌های اسکارنی محدود بوده و با کانی‌سازی چندانی همراه نیست. در این منطقه، اسکارنی‌شدن افزون بر لایه‌های کربناتی، بر سنگ‌های تخریبی گنگلومراپی با قطعه‌های کربناتی نیز اثر داشته است (شکل ۴ پ). عمدۀ کانی‌های شکل گرفته در توده‌های اسکارنی شامل گارنت، زوئیزیت، کلینوزوئیزیت و کلسیت هستند (شکل ۴ ت) که نشانگر اضافه‌شدن سیلیس توسط سیال گرمابی به سامانه است [۲۰]. دگرسانی کربناتی آخرین دگرسانی رخ داده همراه سامانه تخت‌گنبد است، به طوری که بر سایر دگرسانی‌ها در بسیاری از بخش‌ها اثر گذاشته است. این دگرسانی با حضور کلسیت و دولومیت مشخص می‌شود (شکل ۴ ث). نکته قابل توجه حضور یا نبود حضور دگرسانی پتابسیک در این ذخیره است. نتایج پراش پرتو X (XRD) در یک تجزیه عمومی بیانگر حضور اورتوکلاز به عنوان یکی از کانی‌های دگرسانی پتابسیک [۲۱] در بخش‌های عمیق‌تر کانی‌سازی تخت‌گنبد است. با این حال، شناسایی نشدن اورتوکلاز و بیوتیت ثانویه در بررسی‌های میکروسکوپی وجود دگرسانی پتابسیک در این ذخیره را در هاله‌ای از ابهام می‌گذارد.

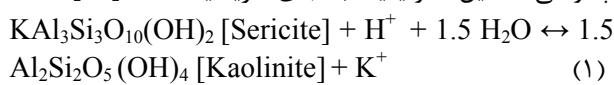
کانی‌سازی

کانی‌سازی درونزاد در منطقه تخت‌گنبد به طور عمدۀ به صورت رگه-رگچه‌ای کوارتزی با ساخت و بافت داربستی رخ داده (شکل ۵ الف) که ناشی از تزریق چندمرحله‌ای محلول‌های گرمابی کانی‌ساز است. افزون بر این، رگه‌های سیلیسی با ضخامت گاهی تا ۱/۵ متر سایر رگه-رگچه‌های کوارتزی را قطع می‌نمایند و ظاهری از ساخت داربستی را در منطقه ذخیره نشان می‌دهند (شکل ۵ ب). از دیگر رگه-رگچه‌های شکل گرفته در ارتباط با سامانه گرمابی تخت‌گنبد می‌توان به رگه-رگچه‌های کربناتی (کلسیت و دولومیت) دربردارنده سولفید (کالکوپیریت) اشاره نمود (شکل ۵ پ) که آخرین نمود سیال‌های گرمابی در این سامانه کانی‌سازی هستند. ضخامت رگه-رگچه‌های کانی‌سازی شده، چه کوارتزی و چه کربناتی، از یک میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است.

رگه-رگچه‌های کوارتزی در گستره پهنه دگرسانی فیلیک حضور دارند که با توجه به روابط پاراژنزی، می‌توان آنها را به ۳ نسل مجزا تقسیم نمود. این سه نسل عبارتند از (۱) رگچه‌های

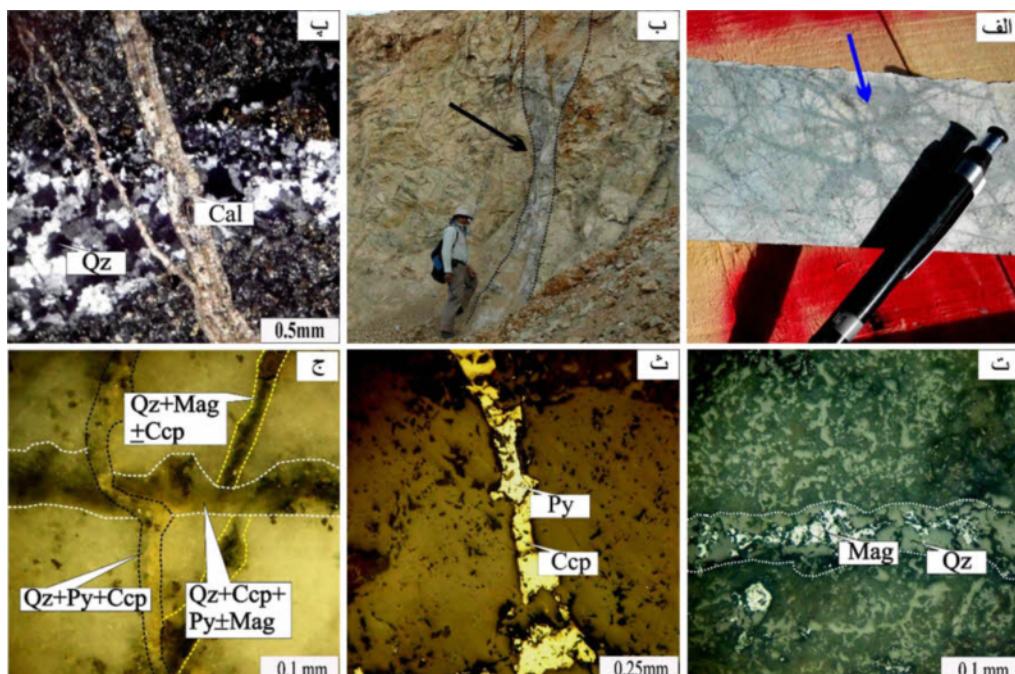
قلیایی خاکی از ساختار سریسیت و ایلیت شسته شده و به خارج از محیط واکنش منتقل می‌شوند. واکنش زیر بیانگر

چگونگی تشکیل کائولینیت به جای سریسیت است [۲۰]:



در شکل ۷، تجمعات کانیایی در ذخیره تخت‌گنبد نمایش داده شده است.

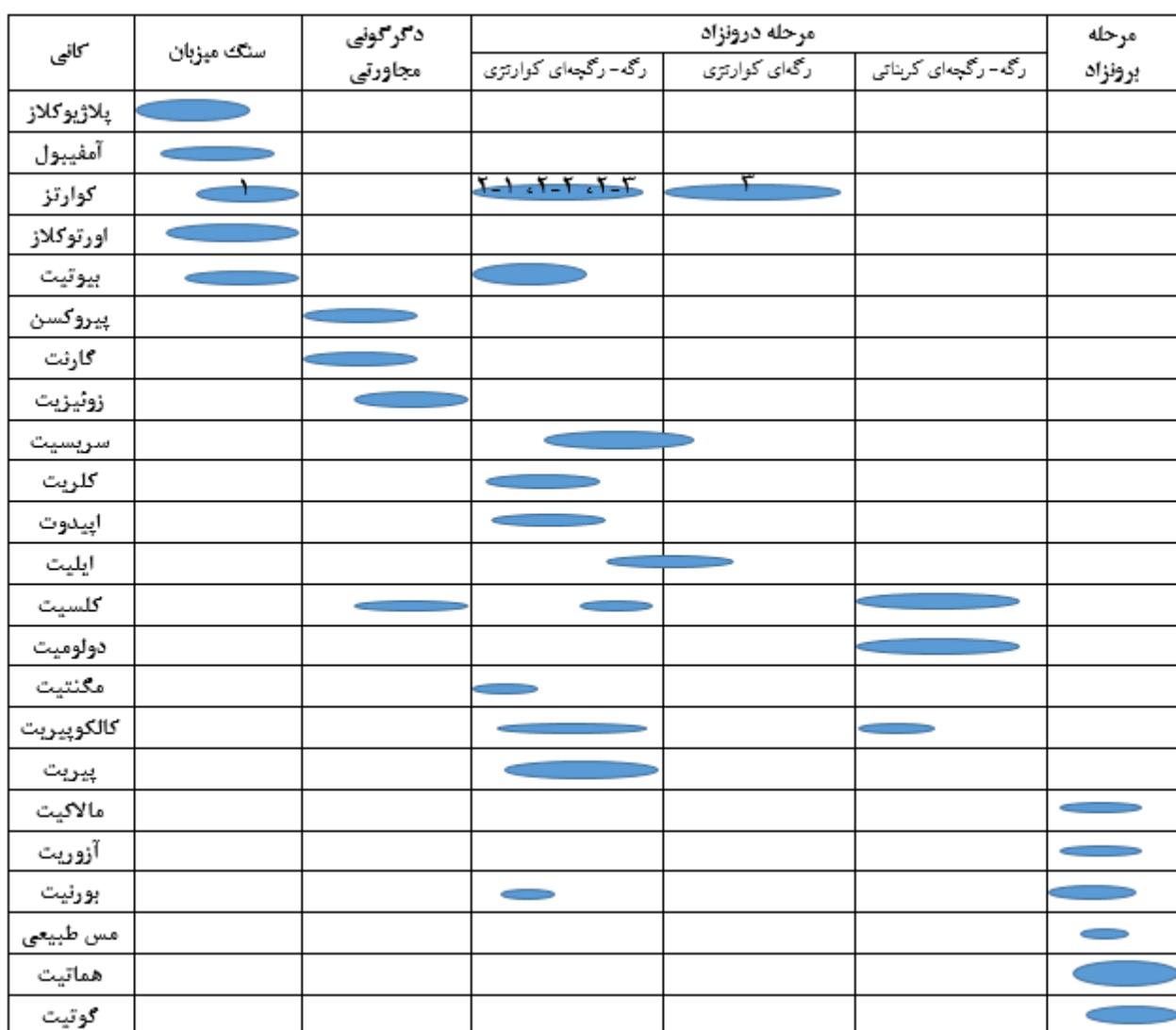
رسی گرمابی هستند. تشخیص کائولینیت بر اساس نتایج XRD صورت گرفته است. به واسطه فرآیندهای برونزاد، پیوند گوگرد و آهن در ساختار پیریت (فراوان‌ترین سولفید اولیه در پهنه دگرسانی فیلیک) شکسته می‌شود و گوگرد آزاد شده در ترکیب با اکسیژن و آب تشکیل اسید سولفوریک می‌دهد. اسید تولید شده طی این فرآیند عامل اصلی جانشینی کائولینیت به جای سریسیت و ایلیت است. در این فرآیند، فلزات قلیایی و



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی، مزوسکوپیکی و صحرایی از انواع رگه-رگچه‌های کانه‌دار سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد: (الف) رگه-رگچه‌های کانی‌سازی شده با بافت داربستی، (ب) رگه‌های ضخیم کوارتزی در گستره گودال معدن، (پ) قطع شدگی رگه‌های کوارتزی توسط رگه‌های کربناتی مرحله آخر، کلسیت (Cal) و کوارتز (Qz)، (ت) رگه-رگچه‌های کوارتز (Qz) + مگنتیت (Mag) ± کالکوپیریت (Ccp) (نور بازتابی (PPL)، (ج) تقدیم و تأخیر رگه-رگچه‌های بازتابی (QZ) ± مگنتیت (Ccp) + کالکوپیریت (QZ) (نور بازتابی (Mag)) (نور بازتابی (PPL)) و (ث) رگه-رگچه‌های کوارتز (Qz) ± کالکوپیریت (QZ) ± مگنتیت (Ccp) (نور بازتابی (Mag)). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۹] هستند.



شکل ۶ تصاویر صحرایی از برونزدهای پهنه‌های کانه‌زایی: (الف) کانی‌سازی مس طبیعی همراه با رگه‌های کوارتزی ضخیم در سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد. (ب) منطقه اکسیدی (بیشتر هماتیت و گوتیت) در بخش‌های سطحی و کم عمق سامانه تخت‌گنبد، دید به سمت غرب و (پ) کانی‌سازی ثانویه مالاکیت-آزوریت در نمونه‌هایمعدنی تخت‌گنبد.



شکل ۷ توالی پارازنی کانی‌های کانسنسی و باطله در سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد.

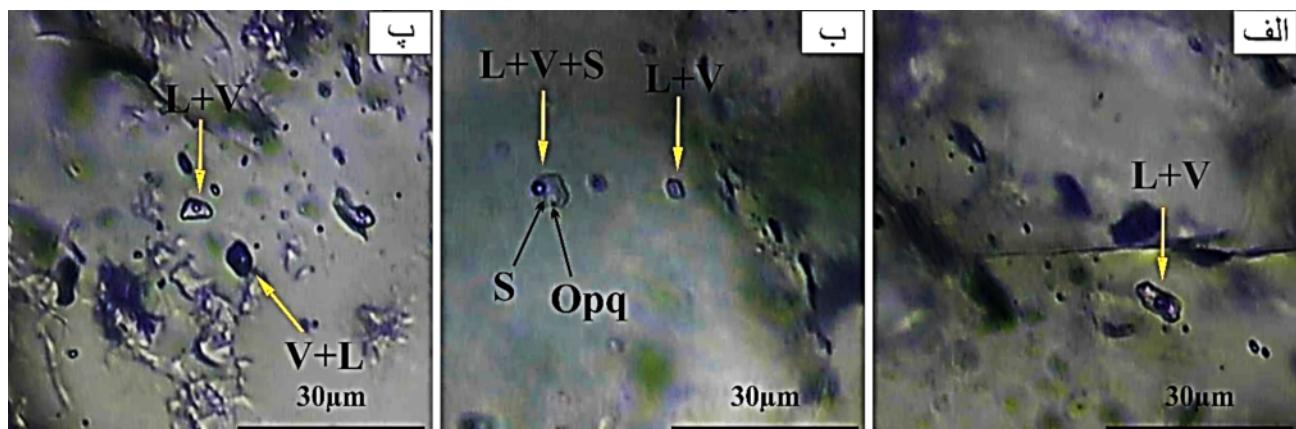
بسیار کم رگه-رگچه‌های نسل اول مانع برای بررسی دقیق میانبارهای این نسل است. دو مقطع دوبر صیقل از رگه-رگچه‌های داریستی و دو مقطع دوبر صیقل از رگه‌های ضخیم کوارتزی (مرحله دوم درونزاد، شکل ۷) ریزدماسنجی شدند که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده‌اند.

بر اساس بررسی‌های سنگنگاری، میانبارهای سیال اولیه با میزبان کوارتز در رگه‌های کوارتزی ضخیم دارای اندازه‌های متغیر از ۵ تا ۱۵ میکرومتر بوده و از نوع اولیه (مایع - گاز) L+V هستند (شکل ۸ الف). این میانبارها اغلب دارای شکل‌های چند وجهی نامنظم هستند. نبود فازهای نوزاد در این میانبارها بیانگر درجه شوری به نسبت پائین سیال‌های مسؤول کانه‌زایی در این رگه‌ها هستند [۳۰].

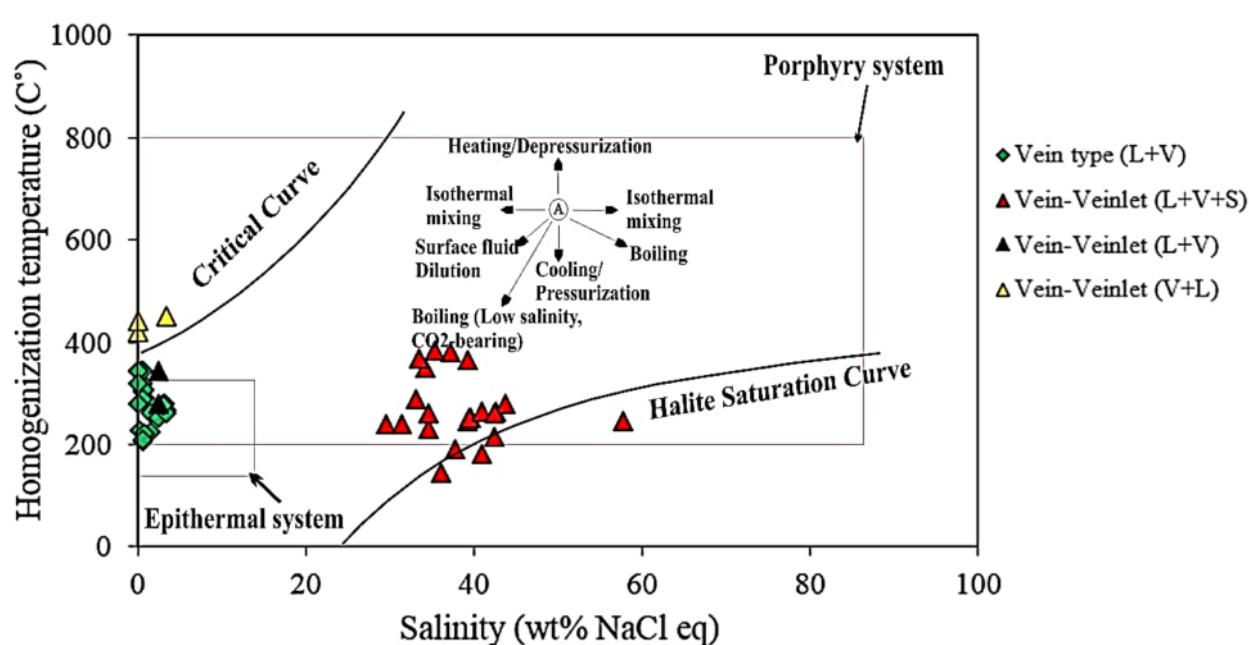
بررسی‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال
بررسی میانبارهای سیال امروزه به ابزاری قدرتمند برای تعیین شرایط تشکیل و نوع کانی‌سازی در سامانه‌های گرمابی از جمله ذخایر پورفیری و فراگرمایی تبدیل شده است [۲۸، ۲۹]. در این پژوهش، از بررسی میانبارهای سیال برای شناسایی نوع، درجه شوری و دمای سیال گرمابی در زمان کانی‌سازی استفاده گردید. برای بررسی میانبارهای سیال در سامانه کانی‌سازی مس تخت‌گنبد از رگه-رگچه‌های کوارتزی کانی‌سازی شده (نسل دوم) با بافت داریستی و رگه‌های ضخیم قطع کننده دگرسانی فیلیک استفاده شد. رگه-رگچه‌های کوارتزی نسل دوم به علت ضخامت مناسب و شباهت با رگه-رگچه‌های نسل سوم برای ریزدماسنجی انتخاب شدند. از طرفی، ضخامت

هالیت و کانی‌های تیره فراوانی کمتری دارد. حضور فراوان هالیت در میانبارهای بررسی شده بیانگر شوری بالا (بیش از ۳۰٪) سیال‌های کانی‌ساز در زمان تشکیل رگه-رگچه‌های داربستی کوارتزی است. میانبارهای L+V و V+L (شکل ۸ پ) نیز میانبارهای L+V+S را همراهی می‌کنند. بر اساس بررسی‌های سنگنگاری، این میانبارهای سیال بیشتر به صورت شکل‌های منفی بلور کوارتز هستند (شکل ۸ ب).

میانبارهای بررسی شده در رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی نیز از نوع اولیه بوده و دارای اندازه‌هایی متغیر از ۶ تا ۱۸ میکرومتر هستند. براساس بررسی انجام شده در مرکز تحقیقات مواد معدنی کرج (ایمیدرو)، اغلب میانبارها از نوع مایع-گاز-جامد (L+V+S) بوده و دارای فازهای نوزاد هالیت (بلور مکعبی شکل درون میانبارها) هستند (شکل ۸ ب). از دیگر فازهای نوزاد همراه با این میانبارها می‌توان به سیلولیت و کانی‌های تیره اشاره نمود (شکل ۹ ت). سیلولیت در مقایسه با



شکل ۸ انواع میانبارهای سیال مورد بررسی در سامانه کانی‌سازی تخت‌گنبد: (الف) میانبارهای مایع + گاز (L+V) در رگه‌های کوارتزی ضخیم، ب و پ) میانبارهای مایع + گاز + جامد (L+V+S)، مایع + گاز (L+V) و گاز + مایع تا گاز (V+L، V) در رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی کانه‌دار.



شکل ۹ توزیع میانبارهای سیال مورد بررسی در نمودار دو متغیره دمای همگنی نسبت به شوری [۲۹، ۳۱].

تحت‌گنبد را تقویت می‌نماید. به نظر می‌رسد که طی جوشش، سیال‌های کانی‌ساز فاز بخار جدا شده از سیال میانبارهای با شوری کم و از نوع $L+V$ و $V+L$ را تشکیل داده‌اند. این در حالی است که سیال باقی مانده از نظر شوری غنی شده است و میانبارهای نوع $L+V+S$ از این سیال شور و با چگالی بالا شکل گرفته‌اند [۲۹، ۳۰].

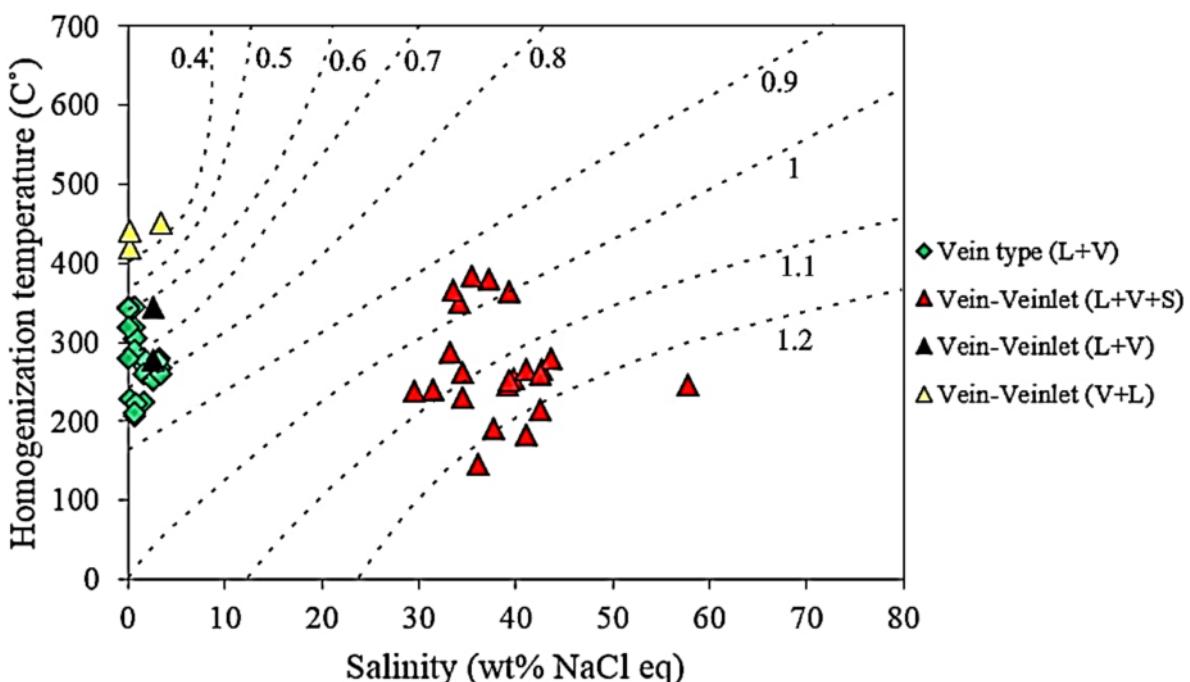
توزیع فراوانی میانبارهای سیال مورد بررسی در رگه‌های کوارتزی ضخیم و رگه-رگچه‌های داربستی سامانه کانی‌سازی تحت‌گنبد بر نمودار شوری نسبت به دمای همگنی ارائه شده است (شکل ۹). بر اساس این نمودار، به نظر می‌رسد که آمیختگی و کاهش دما مهمترین عوامل اثرگذار در تهنشست رگه‌های کوارتزی ضخیم در مراحل آخر فرآیند کانی‌سازی در سامانه گرمابی تحت‌گنبد بوده‌اند. در واقع، به نظر می‌رسد که جوشش عامل مهمی در بی‌ثباتی کمپلکس‌های حمل کننده (از جمله کمپلکس‌های کلریدی) فلزات کانسنگی مثل مس بوده باشد. افزون بر این، حضور دو جمعیت مجزا از میانبارهای سیال از نظر شوری، احتمال رخداد پدیده جوشش را قوت می‌بخشد (شکل ۹). قرارگیری بعضی از میانبارهای سیال در گستره ابر اشاعر هالیت (چنان که پیشتر نیز بیان شد) نشان دهنده تشکیل هالیت در سیال‌های کانی‌ساز در حال جوشش کمی پیش از به دام افتادن است [۳۰]. توزیع فراوانی دمای همگنی نسبت به شوری میانبارهای سیال بررسی شده نشان دهنده جای گرفتن سامانه گرمابی تحت‌گنبد در گستره ذخایر پورفیری و فراگرمابی است (شکل ۹).

بر اساس نمودار دومتغیره دمای همگنی نسبت به شوری [۳۱]، چگالی میانبارهای سیال بررسی شده در رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی کانه‌دار در گستره $0/9$ تا $0/12$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در رگه‌های ضخیم کوارتزی $0/5$ تا $0/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. چگالی بالا در میانبارهای سیال بررسی شده در رگه-رگچه‌های کوارتزی (شکل ۱۰)، گاهی بیش از $1/2$ گرم بر سانتی‌متر مکعب (تشکیل هالیت پیش از به دام افتادن)، مربوط به شوری بالای سیال‌های کانی‌ساز و ناشی از رخداد جوشش در سیال‌های با خاستگاه ماقمایی است. چگالی پایین میانبارهای سیال بررسی شده در رگه‌های کوارتزی ضخیم (شکل ۱۰) می‌تواند در اثر آمیختگی آب‌های زیر زمینی با خاستگاه جوی با سیال‌های گرمابی ماقمایی در مراحل پایانی تکامل سامانه گرمابی تحت‌گنبد باشد.

بر اساس نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال رگه‌های کوارتزی ضخیم، دمای همگنی (Th) و دمای نخستین ذوب یخ (Te) آنها به ترتیب در گستره $20/7$ تا $34/4$ و $21/0$ تا $30/2$ - درجه سانتی‌گراد قرار دارند. دمای آخرین ذوب یخ این میانبارها $0/2$ - درجه سانتی‌گراد بوده که معادل شوری $0/35$ تا $3/39$ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۲). دمای همگنی به نسبت کم و شوری پایین (مشابه سامانه‌های فراگرمابی) می‌تواند در اثر ورود احتمالی سیال‌های جوی به سامانه گرمابی تحت‌گنبد در مراحل آخر تکامل آن باشد. بر این اساس، آمیختگی و کاهش دما را می‌توان به عنوان دو پدیده احتمالی تهنشست در مراحل آخر تکامل سامانه گرمابی تحت‌گنبد در نظر گرفت.

ریزدماسنجی میانبارهای سیال رگه-رگچه‌های داربستی کانی‌سازی شده در سامانه تحت‌گنبد نشان داده که دمای همگنی در گستره $14/6$ تا $45/0$ درجه سانتی‌گراد است. دمای همگنی انواع میانبارهای $L+V$ ، $L+V+S$ و $V+L$ به ترتیب در گستره‌های $14/6$ تا $38/3$ ، $27/8$ تا $42/0$ و $34/5$ تا $45/0$ درجه سانتی‌گراد متغیر است (جدول ۲). شوری بدست آمده با توجه به دمای آخرین ذوب یخ برای میانبارهای $L+V$ حدود $2/57$ درصد وزنی و برای میانبارهای $V+L$ حدود $3/39$ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۲).

دمای انحلال هالیت در میانبارهای چندفازی $S+V+L$ در گستره $13/8$ تا $48/6$ درجه سانتی‌گراد، معادل شوری $29/2$ تا $57/8$ درصد وزنی معادل نمک طعام است. با توجه به حضور هالیت و ثبت دمای انحلال آن، میزان شوری بر اساس آخرین دمای انحلال هالیت محاسبه گردید. در بسیاری از موارد، دمای همگنی میانبارهای چند فازی کمتر از دمای انحلال فاز جامد نمک است که می‌تواند بیانگر اشباع‌شدن احتمالی سیال و تشکیل بلورهای ریز هالیت پیش از به دام افتادن سیال باشد [۳۰]. چنین شوری بالایی طی حبس شدن سیال‌های گرمابی $L+V+S$ و $V+L$ در گیر V ، $V+L$ و $L+V$ احتمال رخداد پدیده جوشش به عنوان یکی از مهمترین عوامل تهنشست کانی‌های کانسنگی از سیال‌ها را تقویت می‌کند [۲۹، ۳۰]. از طرفی، همراهی میانبارهای چند فازی با شوری بالا میانبارهای نوع $L+V$ و $V+L$ به ترتیب با همگنی به فاز مایع و بخار با شوری کم (گاهی تا نزدیک $0/35$ درصد وزنی معادل نمک طعام) احتمال رخداد فرآیند جوشش در سامانه گرمابی



شکل ۱۰ توزیع فراوانی یافته‌های میانبارهای سیال بررسی شده در سامانه کانی‌سازی مس تخت‌گنبد بر نمودار دو متغیره دمای همگنی نسبت به شوری همراه با تغییرات چگالی (خطوط نقطه چین) [۳۱].

های گرمابی با خاستگاه بیشتر ماقمایی در گسترش رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی کانه‌دار است.

۴- حضور میانبارهای سیال غنی از مایع با شوری کم در رگه-های کوارتزی ضخیم می‌تواند بیانگر ورود سیال‌های جوی به سامانه کانی‌سازی مس تخت‌گنبد طی مراحل پایانی تکامل سامانه گرمابی باشد.

۵- بر اساس بررسی میانبارهای سیال، پدیده جوشش عامل شکل‌گیری رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی، و پدیده‌های آمیختگی و سردشدنی عوامل نهشت کانی‌های کانسنگی و باطله در رگه‌های کوارتزی ضخیم در سامانه کانی‌سازی مس تخت‌گنبد هستند.

۶- بر اساس شواهد نوع سنگ میزبان، دگرسانی، شکل کانی-سازی، نوع کانه‌ها و ویژگی‌های سیال‌های مؤثر در کانی‌سازی، ذخیره مس تخت‌گنبد از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی-سازی به سامانه‌های مس پورفیری شباهت دارد.

قدرتانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند، که به این وسیله سپاس خود را از مسؤولین

برداشت

۱- کانی‌سازی درونزاد و برونزاد مس تخت‌گنبد توسط توده میکروگرانودیوریت پورفیری الیگوسن- میوسن و واحدهای سنگی خروجی ائوسن از جمله توف و آگلومرا با ترکیب حدوداً با میان لایه‌هایی از واحدهای رسوبی تخریبی میزبانی می‌شوند.

۲- کانی‌سازی به ترتیب به صورت رگه-رگچه‌ای کوارتزی داربستی، رگه‌ای کوارتزی و رگه-رگچه‌ای کربناتی گسترش یافته است. رگه-رگچه‌های کوارتزی داربستی خود طی سه مرحله تشکیل شده‌اند که آنهای وابسته به هر یک از مراحل کوارتز اول، دوم و سوم به ترتیب در بردارنده مجموعه کانی‌های کوارتز + مگنتیت ± کالکوپیریت، کوارتز + کالکوپیریت + پیریت + مگنتیت، و کوارتز + پیریت + کالکوپیریت هستند.

۳- گسترش بافت داربستی، حضور دگرسانی فیلیک، حضور میانبارهای سیال شامل فازهای جامد نمک طعام، سیلویت و کانی تیره همزاد با میانبارهای غنی از مایع و غنی از گاز، و شوری بالا در برخی از میانبارهای بررسی شده بیانگر اثر سیال-

اعلام می‌دارند. نگارندهان همچنین، از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Salehi Tinooni M., Abedini A., Calagari A. A., “Investigation of mineralization, REE geochemistry, and fluid inclusions studies of the Shalang vein-type polymetallic ore deposit, south of Kerman”, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2019) 975-988.
- [10] Nedimovic R., “Exploration for ore deposits in Kerman Region”, Geological Survey of Iran, Report No.53 (1973) 1-274.
- [12] Ghorbani M., “The economic geology in Iran: Mineral deposits and natural resources”, Springer Science Business Media, Dordrecht (2013) 1-581.
- [13] Mining Company of Zamin Pajouhan., quot, “Geological map of the Takht-e Gonbad copper deposit, Sirjan, scale 1:1000”, Internal Reports (2010) 1-180 (in Persian).
- [14] Sirjan Takht-e-Gonbad Copper Company., “Report of geological map of the Takht-e-Gonbad district mine”, (2010) 1-102 (in persian).
- [15] Khan-Nazer N. H., “Geological map of the Chahar-Ghonbad (1:100000 scale)”, Geological Survey of Iran (1994).
- [16] Dimitrijevic M. D., “geological map of the Chahar Gonbad (1:100000 scale)”, Geological Survey of Iran (1973).
- [17] Fazlnia A., “Petrography and petrology of the Chahar-Ghonbad intrusive masses”, MSc Thesis, University of Shahid Bahonar, Kerman, Iran (2000) 1-180 (in Persian).
- [18] Anssary A. H., Sheikh Zakariaii S. J., Dargahi S., Arvin M., “Petrology and Geochemical properties of the Granitoid Complex of the Chahar-Gonbad, Southeast Iran”, Open Journal of Geology 7 (2017) 847-858.
- [19] Whitney D. W., Evans B. W., “Abbreviations for names of rock forming minerals”, American Mineralogist 95 (2010) 185-187.
- [20] Shahabpour J., “Economic Geology”, Publications of Shahid Bahonar University of the Kerman (2005) 1-544 (in Persian).
- [21] Watanabe Y., Sato R., Sulaksono A., “Role of potassic alteration for porphyry Cu mineralization: Implication for the absence of porphyry Cu deposits in Japan”, Resource Geology 68 (2018) 195-207.
- [1] Shafiei B., “Two distinct occurrences in Palaeogene magmatic of Cenozoic magmatic arc of the Kerman: Geochemical characteristics and rock-forming processes”, Journal of Sciences, University of Tehran 36 (2010) 137-156 (in Persian).
- [2] Naimi- Ghasabian N., Khatib M. M., Nazari H., Heyhat M. R., “Present- day tectonic regime and stress patterns from the formal inversion of focal mechanism data, in the North of Central- East Iran blocks”, Journal of African Earth Sciences 111 (2015) 113-126.
- [3] Stocklin J., “Structural history and tectonic of Iran: A review”, American Association of Petroleum Geologists Bulletin USA 52 (1968) 1229-1258.
- [4] Dimitrijevic M. D., “1:100000 geological map of the Chahar Gonbad”, Geological Survey of Iran (1973).
- [5] Atapour H., Aftabi A., “Geochemistry and metallogenesis of calc-alkaline, shoshonitic and adakitic igneous rocks associated with porphyry Cu-Mo and vein type deposits of Dehaj-Sardueh volcano-plutonic belt, Kerman”, Geosciences 18 (2009) 161-172.
- [6] Behpour S., Moradian A., Ahmadipour H., “Application of amphibole and plagioclase mineral chemistry for studying of Jebal-E-Barez granitoid genesis and geothermobarometry (Kerman province, Bam)”, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2018) 751-766.
- [7] Salehinejad H., Ahmadipour H., Moeinzadeh H., Moradian A., “Using mineral chemistry for determination of crystallization conditions and tectonic setting of diabasic intrusive rocks from Deh-Zahir area (west of rafsanjan)”, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 809-820.
- [8] Aghanabati S.A., “Geology of Iran”, Geological Survey of Iran (2004) 1-606 (in Persian).
- [9] Ahmadi S., Tahmasbi Z., Ahmadi Khalaji A., Zal F., “Mineral chemistry of tourmaline in

- Economic Geology 100th Anniversary Volume (2005) 251-298.
- [27] U. S. Geological Survey., "Preliminary model of porphyry copper deposits", Open File Report 1321 (2008) 1-62.
- [28] Pirajno F., "Hydrothermal processes and mineral systems", Springer (2009) 1-1243.
- [29] Wilkinson J. J., "Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits", Lithos 55 (2001) 229-272.
- [30] Shapard T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., "A practical guide to fluid inclusion studies", Blackie, Glasgow (1985) 1-239.
- [31] Roedder E., Bodnar R. J., "Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies", Earth and Planetary Science Letters 8 (1980) 263-301.
- [22] Hosseini M., Ghaderi M., Alirezaei S., "Types of vein-veinlet systems and their relationship with mineralization in the Takht-e-Gonbad ore deposit, northeast of Sirjan", 15th Symposium of Iranian Geological Association, Teacher Training University of Tehran (2011).
- [23] Sillitoe R. H., "Porphyry copper systems", Economic Geology 105 (2010) 3-41.
- [24] Gustafson L. B., Hunt J. P., "The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile", Economic Geology 70 (1975) 857-912.
- [25] Robb L. J., "Introduction to ore-forming processes", Blackwell Publishing (2005) 1-373.
- [26] Seedorff E., Dilles J. H., Proffett J. M., Einaudi M. T., Zurcher L., Stavast W. J. A., Johnson D.A., Barton M.nD., "Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features",