مجله زمین‌شناسی اقتصادی
سال ۱۳۹۰، شماره ۱ (جلد ۳)
صفحه: ۴۱ تا ۶۰

Journal of Economic Geology
2011, No. 1 (Vol. 3)
ISSN 2008-7306

سن‌سنجی زیرکان به روش اورانیم- سرب در منطقه اکتشافی مس- طلا پورفیری ماهرآباد: شاهدی بر دوره متالوژنیک ائوسن میانی ذخایر پورفیری در شرق ایران

آزاده ملک‌زاده شفارودی[1] و محمدحسن کریم‌پور

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۷/۱۷، نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۹/۲۰

چکیده

شرق ایران به‌واسطه رژیم تکتونیکی زون فرورانش در گذشته که به فعالیتهای ماگماتیسمی آلکالن تا کالک‌آلکالن گسترده در زمان ترشیری انجامیده است، پتانسیل خوبی برای تشکیل کانسارهای مس پورفیری دارد. ماهرآباد اولین منطقه اکتشافی مس- طلای پورفیری بوده که در شرق ایران کشف شده است. این کانسار وابسته به یک سری استوک‌های پورفیری مونزونیتی تا دیوریتی است که درون سنگهای آتشفشانی جایگزین شده‌اند. پورفیری‌های مونزونیتی، نقش اساسی را در کانی‌سازی داشته‌اند. زون‌های دگرسانی گسترده‌ای شامل پتاسیک، سریسیتیک- پتاسیک، کوارتز- سریسیت- کربنات- پیریت، کوارتز- کربنات- پیریت، سیلیسی- پروپیلیتیک، پروپیلیتیک، کربناته و سیلیسی وجود دارد. کانی‌سازی به حالتهای افشان، استوک‌ورک و برش هیدروترمالی اتفاق افتاده است. براساس اکتشاف اولیه، مس بین ۱۷۹ تا ۶۸۳۰ گرم در تن (میانگین ۳۲۰۰ گرم در تن) و طلا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در تن (میانگین ۵۷۰ میلی‌گرم در تن) وجود دارد. این منطقه اکتشافی یک ذخیره مس پورفیری غنی از طلاست. سن‌سنجی لیزر- ابلیشن اورانیم- سرب روی دو نمونه از توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی نشان می‌دهد که پورفیری‌های مونزونیتی در ۰/۸ ± ۳۹ تا ۰/۸ ± ۳۸/۲ میلیون سال پیش در فاصله زمانی کمتر از یک میلیون سال در ائوسن میانی متبلور شده‌اند. این اولین سن دقیق را برای دوره کانی‌سازی‌های نوع پورفیری مشخص می‌کند. همچنین نسبت ایزوتوپ اولیه $(^{87}Sr/^{86}Sr)i$ و $(^{143}Nd/^{144}Nd)i$ اولیه با توجه به سن ۳۹ میلیون سال محاسبه شد. نسبت ایزوتوپ اولیه $(^{87}Sr/^{86}Sr)i$ در توده‌های مونزونیتی بین ۰/۷۰۴۷ تا ۰/۷۰۴۸ بوده است. نسبت $(^{143}Nd/^{144}Nd)i$ اولیه نیز بین ۰/۵۱۲۶۹۴ تا ۰/۵۱۲۷۱۳ می‌باشد. میزان ε_{Nd} اولیه بین ۱/۴۵ تا ۱/۸۱ است. براساس داده‌های ایزوتوپی منشاء ماگمای اولیه خارج از پوسته قاره‌ای بوده است. این پژوهش می‌تواند برای بررسی جایگاه تکتونو- ماگماتیکی و تکامل شرق ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: *بلوک لوت، ائوسن میانی، زیرکن، زمان‌سنجی زمین‌شناسی، لیزر ابلیشن ICP-MS*

مقدمه

سن‌سنجی سنگهای آذرین را می‌توان به روشهای مختلف از جمله روش Fission track و یا اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های رادیوژنیک مختلف مانند K-Ar، U-Th و یا U-Pb و بر روی کانیهای متفاوت انجام داد. انتخاب روش تعیین سن بستگی به تاثیر پدیده‌های حرارتی مانند دگرگونی ناحیه‌ای و یا تاثیر محلولهای ماگمایی- گرمابی (آلتراسیون) در طی زمان دارد که بعد از تشکیل سنگ بر روی آن اثر گذاشته‌اند. زیرا حرارت دیدن سنگ آذرین می‌تواند تغییراتی در زمان ثبت شده تشکیل توده در کانیها ایجاد کند. در این میان بهترین روش سن‌سنجی، استفاده از کانی زیرکان با اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های U-Pb است. زیرا این کانی قادر است تا دمای بالای ۹۰۰ درجه سانتی گراد را تحمل کند.

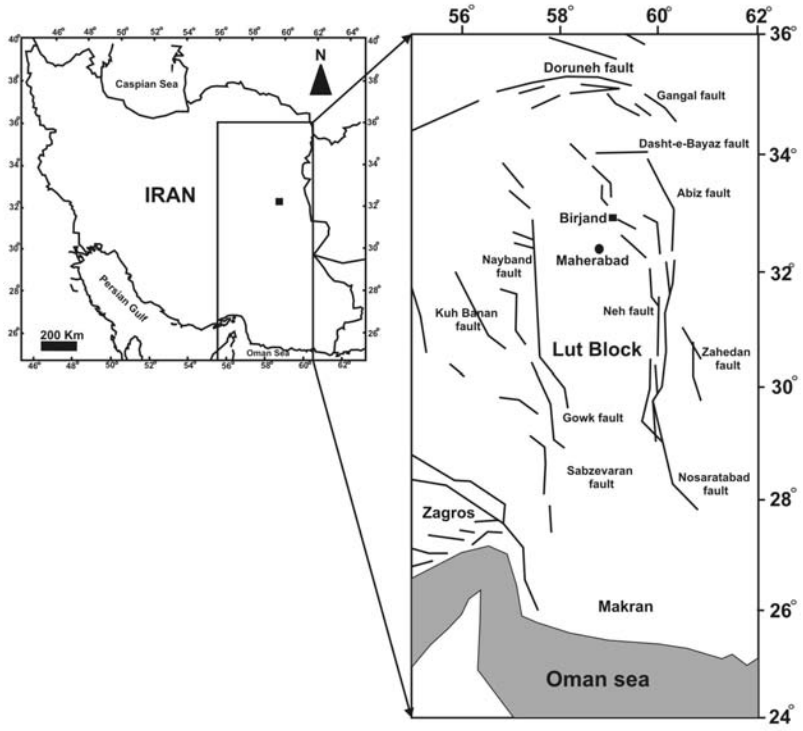
[1] مسؤول مکاتبات Aza_malek@yahoo.com

زیرکان یکی از کانیهای فرعی و معمول در تعداد زیادی از سنگها به ویژه سنگهای آذرین فلسیک است [۱-۴]. از ویژگیهای این کانی می‌توان به مقاومت بالا در برابر هوازدگی، آلتراسیون، دگرگونی و حرارت اشاره نمود [۵]. این خواص بی-نظیر باعث شده تا زیرکان در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای مختلف داشته باشد. گسترده‌ترین استفاده از این کانی در زمین‌شناسی، مطالعات زمین سن‌سنجی است [۶-۱۲].

منطقه اکتشافی ماهرآباد در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان بیرجند، مرکز استان خراسان جنوبی، در محدوده بین طولهای جغرافیایی ″۴۶ ′۴۹ °۵۸ تا ″۱۸ ′۵۷ °۵۸ شرقی و عرضهای جغرافیایی ″۱۲ ′۲۶ °۳۲ تا ″۴۵ ′۳۱ °۳۲ شمالی قرار دارد. این کانسار از نظر تقسیمات ساختاری در شرق بلوک لوت واقع شده است (شکل ۱).

شرق ایران و به ویژه بلوک لوت به واسطه وقوع فرورانش در زمانهای گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسم، پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی‌سازیهای مختلف به خصوص کانسارهای مس پورفیری دارد. شواهدی از این نوع کانی‌سازی در نقاط مختلف شرق ایران نیز معرفی شده است مانند ده‌سلم، رحیمی، چاه‌شلغمی و ....[۱۳-۱۵]؛ ولی تاکنون کار اکتشافی جدی بر روی آنها صورت نگرفته است. به نظر می‌رسد این بخش از ایران می‌تواند دومین کمربند مهم مس پورفیری ایران پس از زون ارومیه- دختر باشد. همچنین بیش از ۷۰ درصد سنگهای رخنمون داشته در نیمه شمالی لوت، آتشفشانی و یا نیمه عمیق- دورنی هستند که متعلق به ترشیاری می‌باشند. اما سن مطلق این سنگها به ویژه توده‌های مرتبط با کانی‌سازیهای مس پورفیری گزارش نشده است.

در این مقاله نتایج سن‌سنجی زیرکان به روش اورانیوم- سرب بر روی توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی مس- طلا پورفیری ماهرآباد بحث شده است. از آن جایی که این منطقه اولین کانی‌سازی مس پورفیری شرق ایران است که مفصلا مورد بررسی قرار گرفته، تعیین سن توده‌های نفوذی بارور که در واقع سن کانی‌سازی را مشخص می‌کند از اهمیت زیادی برخوردار است. این نتیجه می‌تواند گامی در فهم دوره متالوژنیک ذخایر مس پورفیری بلوک لوت باشد و نیز به بررسی جایگاه تکتونوماگمایی شرق ایران کمک کند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه اکتشافی ماهرآباد در بلوک لوت و شرق ایران

روش مطالعه

برای بررسی تفصیلی منطقه اکتشافی ماهرآباد، انتخاب درست نمونه‌های سن‌سنجی و تعیین سن بر روی کانی زیرکان مطالعات زیر انجام گرفت:

۱- مطالعه حدود ۳۵۰ مقطع نازک و نازک صیقلی از نمونه‌های سطحی و زیرسطحی

۲- تهیه نقشه زمین‌شناسی رقومی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ از کل منطقه و مقیاس ۱:۲۰۰۰ از بخشهای مهم کانی‌سازی با تاکید ویژه بر تفکیک توده‌های مرتبط با کانی‌سازی از توده‌های عقیم

۳- تهیه نقشه آلتراسیون رقومی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ از کل منطقه و مقیاس ۱:۲۰۰۰ از بخشهای مهم کانی‌سازی

۴- تهیه نقشه تراکم رگه‌چه رقومی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ از کل منطقه و مقیاس ۱:۲۰۰۰ از بخشهای مهم کانی‌سازی به منظور فهم بهتر ارتباط کانی‌سازی و نوع توده‌ها

۵- مطالعه جمعاً ۶۳۰ متر مغزه متعلق به چهار گمانه حفر شده و تهیه لاگهای زمین‌شناسی- آلتراسیون- کانی‌سازی آنها

۶- تجزیه ژئوشیمیایی ۹ نمونه از توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی به روش XRF برای اکسیدهای اصلی و روش ICP-MS برای عناصر فرعی و نادرخاکی

۷- انتخاب دو نمونه برای سن‌سنجی پس از مطالعات دقیق صحرایی، تعیین روابط زمانی نسبی توده‌ها، ارتباط آنها با کانی‌سازی، بررسیهای پتروگرافی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی

در این انتخاب سعی شد تا اولاً توده‌های مونزونیتی که منشأ اصلی کانی‌سازی تشخیص داده شده‌اند، مد نظر ویژه قرار بگیرد. سپس علاوه بر حضور زیرکان به عنوان کانی فرعی می‌بایست به اندازه دانه‌ها توجه می‌شد. زیرادانه‌های درشت‌تر از ۳۵ میکرون مناسب سن‌سنجی هستند. در بین توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی ماهرآباد نمونه‌های مختلفی از توده‌های مونزونیتی محدوده MA-I (به دلیل اهمیت این بخش و نزدیکی آن به مرکز سیستم کانی‌سازی) مورد مطالعه و حتی بعضاً آماده‌سازی اولیه قرار گرفتند، که تنها در دو نمونه زیر، زیرکان‌های مناسب و به تعداد مورد نیاز برای آنالیز سن-سنجی یافت شد:

۱- نمونه MA-90 واحد هورنبلند کوارتز مونزونیت پروفیری با آلتراسیون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت؛ و

۲- نمونه MA-64 واحد بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری با آلتراسیون سیلیسی- پروپلیتیک.

زیرکان یک کانی سنگین با وزن مخصوص حدود ۴/۸ گرم بر سانتی متر مکعب است که به دلیل همین ویژگی می‌توان آن را به راحتی و با استفاده از مایعات سنگین مختلف جدا کرد. البته در این میان کانیهای سنگین دیگر هم جدا می‌شوند که در نهایت با جدایش دستی زیر میکروسکپ بینوکلار می‌توان زیرکان‌ها را جدا نمود. به منظور جداسازی زیرکان از دیگر کانیهای سنگ مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

- خردایش: در این مرحله نمونه‌های سنگی به وزن تقریبی ۹ تا ۱۰ کیلوگرم حدود ۲ تا ۳ مرحله در سنگ‌شکنی که کاملاً تمیز شده بود، خردایش شدند (دهانه سنگ‌شکن هر بار کوچکتر می‌شد تا اندازه ذرات کوچکتر شود). خردایش تا زمانی ادامه پیدا کرد که بیش از ۶۰ درصد نمونه به اندازه کمتر از ۴۰ مش (۰/۴۲ میلی متر) برسد؛
- الک‌کردن: پس از هر مرحله خردایش، محصول سنگ‌شکن از یک الک ۴۰ مش که قبلاً با هوای فشرده کاملاً تمیز شده بود، عبور داده می‌شد تا ذرات ریزتر از ۰/۴۲ میلی متر از آن جدا شوند. باقی مانده ذرات روی الک دوباره به سنگ‌شکن برگردانده می‌شد تا دوباره خردایش شوند؛
- لاوک‌شویی: ذرات عبور کرده از الک لاوک‌شویی شدند تا بخش زیادی از کانیهای سبک جدا شده و کانیهای سنگین باقی بمانند؛
- خشک‌کردن: پس از مرحله لاوک‌شویی، نمونه‌ها در اتاق پهن شدند تا به طور طبیعی خشک شوند؛
- استفاده از مایع سنگین: در این مرحله از مایع سنگین برموفرم ($CHBr_3$) با وزن مخصوص ۲/۸۴ گرم بر سانتی متر مکعب برای جدایش کانیهای سنگین از جمله زیرکان استفاده شد. کانیهای سنگین

در این روش در ته ظرف محتوی این مایع جمع می‌شوند؛

- مطالعه نمونه با استفاده از میکروسکپ بینوکلار: کانیهای سنگین جمع شده در ته مایع برموفرم پس از خشک شدن نمونه در زیر میکروسکپ بینوکلار به دقت مطالعه شدند و زیرکان‌ها با دست جدا شدند.

البته لازم به ذکر است که در موقع جدایش بهتر است بهترین و مناسب‌ترین نمونه‌ها انتخاب شوند. طولهای بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون مناسب‌ترین نمونه‌های زیرکان برای آنالیز هستند. از نمونه MA-90 تعداد ۷۴ زیرکان با اندازه‌های بین ۴۰ تا ۱۴۰ میکرون و از نمونه MA-64 تعداد ۶۴ زیرکان با اندازه‌های بین ۴۰ تا ۲۲۰ میکرون استخراج شد.

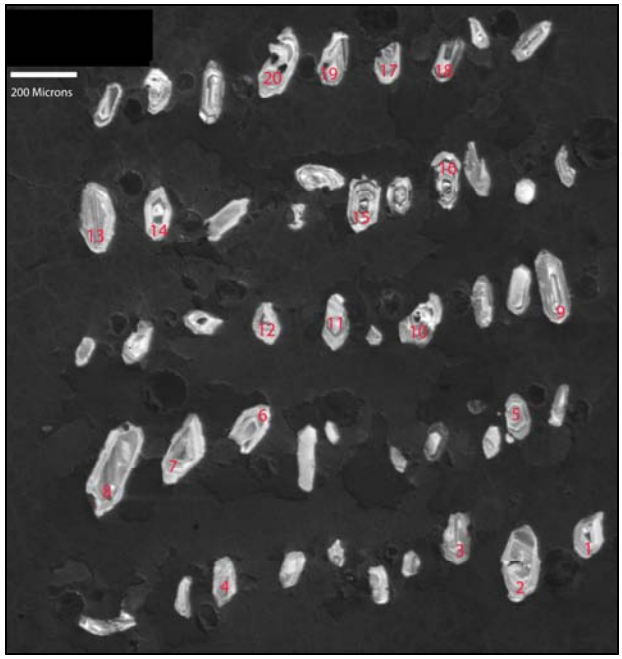
زیرکان‌های جدا شده برای تعیین سن به مرکز Laser Chron آریزونا در دانشگاه آریزونای آمریکا فرستاده شدند. در آن جا از روش Laser-Ablation multi collector ICP-MS برای سن‌سنجی استفاده می‌شود. زیرکان‌ها ابتدا در یک پلاک اپاکسی به قطر ۱ اینچ همراه با خرده‌هایی از زیرکان استاندارد ID-TIMS و شیشه‌های NIST SPM610 قالب‌گیری شده، سپس این پلاکها نصف شده و صیقل می‌خورند. عکس زیرکان‌ها در نور عبوری، انعکاسی و نیز در زیر میکروسکپ کاتدولومینسانس (CL) گرفته می‌شود. تصویر CL ساختار داخلی دانه‌های زیرکان برش‌خورده را نشان می‌دهد و با استفاده از آن مکانهای مناسب برای اشعه لیزر در قسمتهای هموژن بلور انتخاب می‌گردند. شکل (۲) تصویر کاتدولومینسانس زیرکان‌های نمونه MA-64 و محل انتخاب شده برای آنالیز را نشان می‌دهد.

روش Laser-Ablation ICP-MS قادر است تا سن‌سنجی به روش اندازه‌گیری U-Pb را با صحت بهتر از ۲٪ (۲ سیگما) و تفکیک مکانی چند میکرون انجام دهد. این روش معمولاً با یک اشعه به قطر ۳۵ یا ۲۵ میکرون و اگر لازم باشد در دانه‌های ریزتر به قطر ۱۵ یا ۱۰ میکرون صورت می‌پذیرد. اشعه ۳۵ یا ۲۵ میکرونی با نرخ تکرار ۸ هرتز و انرژی ۱۰ میکروژول تنظیم می‌شود که می‌تواند یک سیگنال تقریباً ۱۰۰۰۰۰ cps در گرم در تن برای U در زیرکان تولید کند. برای اندازه‌های کوچکتر اشعه لیزر، انرژی (۶۰ میکروژول) و نرخ تکرار (۴ هرتز) کاهش می‌یابد. در هر دو حالت ذکر شده مواد برانگیخته شده توسط اشعه لیزر از یک اتاقک گاز هلیم عبور می‌کنند. گاز هلیم و نمونه برانگیخته شده قبل از ورود به محیط پلاسما ICP-MS با گاز آرگون مخلوط می‌شوند. مقدار Pb ایزوتوپی نسبت به Th و U به کمک نمونه استانداری که همراه با زیرکان‌ها قالب‌گیری شده و هر بار با اندازه‌گیری سه تا پنج نمونه مجهول،اندازه‌گیری آن تکرار می‌شود، محاسبه می‌گردد. نمونه استاندارد زیرکان ID-TIMS نمونه زیرکانی از سریلانکا با سن Ma ۵۶۳/۵ ± ۳/۲ می‌باشد. همچنین مقدار Th و U نمونه‌های مجهول با شیشه‌های NIST SRM610 مورد سنجش قرار می‌گیرد. مقدار U این شیشه‌ها ۴۶۲ گرم در تن و مقدار Th آن ۴۵۷ گرم در تن می‌باشد. قطعیت آنالیزهای انجام شده حدود ۲ سیگما (تقریباً ۱ درصد) برای $^{206}Pb/^{238}U$ و $^{206}Pb/^{207}Pb$ است.

پس از اتمام کار، رسم نمودار کنکوردیا [۱۶]، رسم نمودارهای تراکمی و محاسبات سنهای میانگین از داده‌های $^{206}Pb/^{238}U$ و $^{206}Pb/^{207}Pb$ توسط ISOPLOT/EX [۱۷] انجام می‌گیرد. سنهای میانگین $^{206}Pb/^{238}U$ با حد اطمینان ۹۵/۹ تا ۹۶/۹ درصد در این روش محاسبه می‌شود.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

منطقه اکتشافی مس- طلا پورفیری ماهرآباد در شرق بلوک لوت واقع شده است (شکل ۱). بلوک لوت بخشی از ایران مرکزی است که در دوران پالئوزئیک پلاتفرم یکسانی را تشکیل می‌داده‌اند. در طول مزوزوئیک و ترشیاری، به سبب حرکات کوه زایی شدید، شکستگی و جدایشی اتفاق می‌افتد که منجر به ایجاد خط واره‌های مختلف شده و ایران مرکزی را به بلوکهای موزاییک شکلی تقسیم می‌کند. بلوک لوت با حجم عظیم ماگماتیسم در ترشیاری مشخص شده و توسط گسلهای شمال- جنوبی در شرق و غرب از دیگر قسمتها جدا می‌شود [۱۸]. برطبق اشتوکلین و نبوی [۱۹] بلوک لوت ۹۰۰ کیلومتر طول از گسل درونه در شمال تا حوضه جازموریان در جنوب و ۲۰۰ کیلومتر عرض از گسل نایبند و کوههای شتری در غرب تا گسل نهبندان در شرق دارد (شکل ۱). جایگاه پالئوتکتونیکی بلوک لوت به درستی مشخص نیست. چندین کار کلی روی تکتونیک و ماگماتیسم لوت انجام شده که خیلی ناقص بوده و گاه ضد و نقیض هستند [۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳]. با این همه وقوع فرورانش بین بلوک لوت در غرب و بلوک افغان در شرق به دلیل وجود حجم عظیم ماگماتیسم قطعی است.



شکل ۲. تصویر کاتدولومینسانس زیرکان‌های نمونه MA-64 و نقاط انتخاب شده برای آنالیز بر روی آن

تنوعی از انواع کانی‌سازی مس- طلا شامل مس- طلا پورفیری (ماهرآباد، خوپیک و ده‌سلم)، مس- طلا همراه با اکسید آهن (قلعه‌زری)، نوع رگه‌ای (سه چنگی، حوض رئیس و غار کفتری) و طلای اپی‌ترمال (شیخ آباد و هنیچ)، یک اپیزود متالوژنیک ترشیاری را به ویژه در شمال و شمال شرق نشان می‌دهد.

محدوده اکتشافی ماهرآباد از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای در گوشه شمال شرقی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور [۲۴] قرار گرفته است. برطبق این نقشه، بخش اعظم منطقه شامل سنگهای آتشفشانی در حد آندزیت، داسیت، ریولیت، توف و ایگنمبریت است که در برخی نقاط مورد نفوذ سنگهای نیمه‌عمیق اسیدی- حدواسط واقع شده‌اند. اما مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی این پروژه نشان‌داد که بسیاری از واحدهایی که در نقشه، سنگ آتشفشانی معرفی شده‌اند، توده-های نفوذی نیمه‌عمیق هستند.اکثر سنگهای آتشفشانی- نفوذی منطقه آلتره شده‌اند و کانی‌سازی استوک‌ورک، افشان و برش هیدروترمالی در برخی نقاط مشاهده می‌شود.

زمین‌شناسی و پتروگرافی کانسار

براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در محدوده اکتشافی ماهرآباد را می‌توان به چهار بخش به شرح زیر تقسیم کرد (شکل ۳): ۱- سنگهای آتشفشانی قبل از ائوسن میانی که مورد نفوذ توده‌های نیمه عمیق ائوسن میانی مرتبط با کانی‌سازی قرار گرفته‌اند، ۲- توده‌های نیمه عمیق عمدتاً حدواسط ائوسن میانی مرتبط با کانی‌سازی در حد مونزونیت تا دیوریت که با شدتهای مختلف آلتره شده و دارای کانی‌سازی با مقادیر متفاوت می‌باشند، این توده‌هابه صورت استوک‌های کوچک تا متوسط درهم تلسکوپی شده‌اند. بیش از ۱۵ واحد نیمه عمیق مرتبط با کانی‌سازی در کل منطقه شناسایی شده است، ۳- توده‌های نیمه عمیق بعد از ائوسن میانی که در توده‌های مرتبط با کانی‌سازی نفوذ نموده‌اند. این توده‌ها نیز از دیوریت تا مونزونیت در تغییر بوده و کاملاً تازه هستند. اثری از کانی‌سازی و آلتراسیون در آنها دیده نمی‌شود، و ۴) رسوبات کواترنری [۲۵].

توده‌های مونزونیتی به سبب همراه بودن با آلتراسیون‌های پتاسیک و کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، تراکم بالای رگه چه‌های کوارتز- سولفیدی و داشتن بالاترین ناهنجاریهای مس و طلا، منشأ کانی‌سازی در منطقه هستند.

در یک محدوده وسیع آلتره شده به وسعت تقریبی ۱۳۲ کیلومتر مربع سه ناحیه مهم از لحاظ کانی‌سازی به نامهای MA-I، MA-II و MA-III وجود دارد (شکل ۳) که اغلب کارهای اکتشافی بر روی MA-I انجام شده است. در این بخش تا بیش از ۶۰ رگه‌چه در مترمربع در سطح و نیز در گمانه‌های حفاری شده دیده شد. از آن جایی که سن‌سنجی توده‌ها در این بخش از منطقه انجام شده است، زمین‌شناسی و پتروگرافی همین ناحیه در ادامه توضیح داده می‌شود.

زمین‌شناسی محدوده اکتشافی MA-I شامل توده‌های مونزونیت پورفیری، هورنبلند مونزونیت پورفیری، بیوتیت مونزونیت پورفیری، هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری، هورنبلند بیوتیت مونزونیت پورفیری، بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری، بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری، بیوتیت پیروکسن مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری، بیوتیت پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری و پیروکسن بیوتیت هورنبلند مونزودیوریت پورفیری می‌باشد (شکل ۴) [۲۵].

مونزونیت پورفیری که در بخش شرقی ناحیه رخنمون دارد بافت پورفیری دارد. فنوکریست‌ها شامل ۱۰-۱۲٪ پلاژیوکلاز تا ۵ میلی متر طول و ۱۰-۱۳٪ فلدسپات پتاسیم تا ۱ میلی متر طول است. فلدسپاتها به سرسیت، کلسیت، کائولینیت،

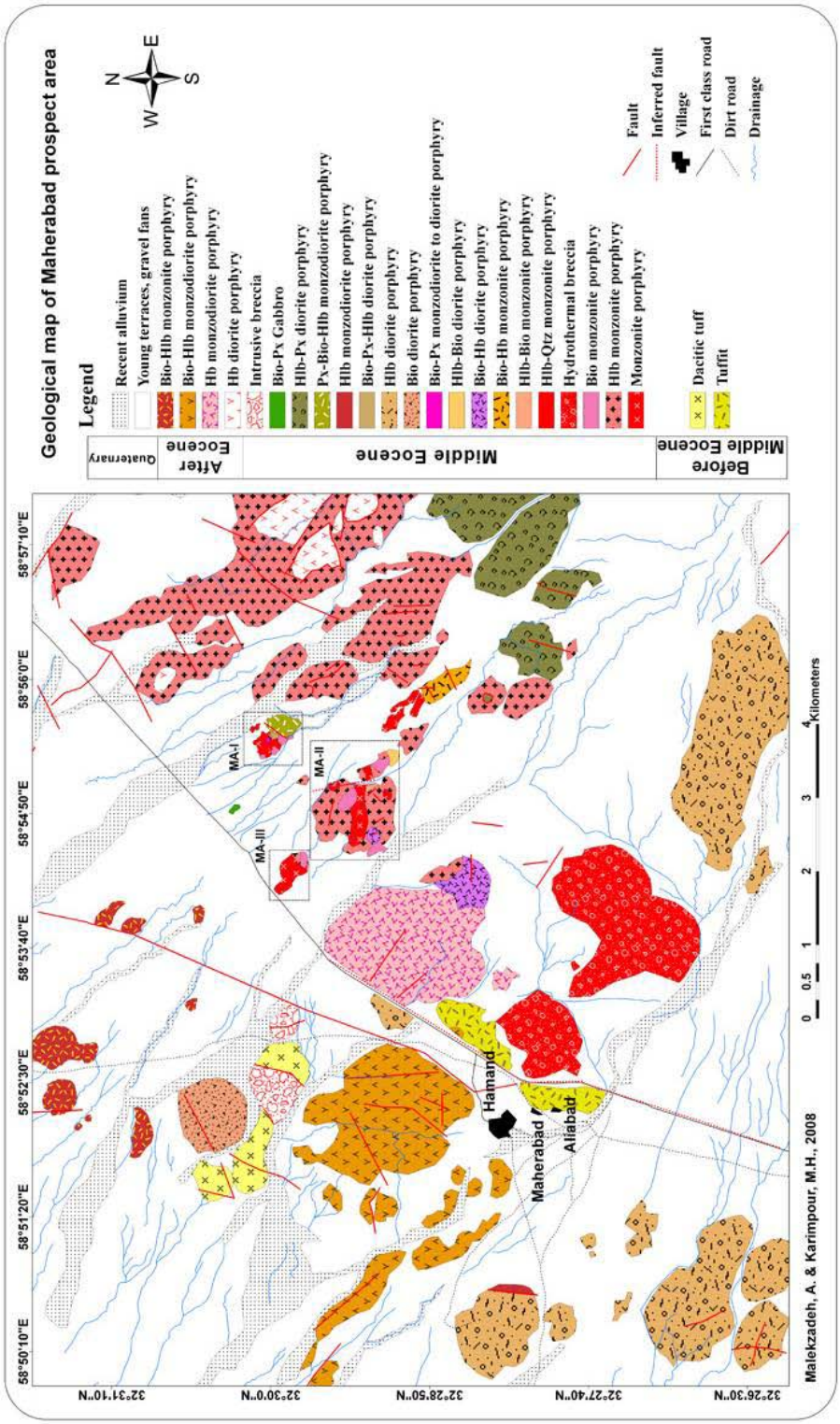
مونت موریونیت و ایلیت آلتره شده‌اند. زمینه سنگ بافت دانه شکری داشته و شامل فلدسپات‌های آلتره شده، کوارتز اولیه، کانیهای فرعی، کوارتز ثانویه، سرسیت، کلسیت، کانیهای رسی و بعضاً کانیهای سولفیدی می‌باشد. این توده همراه با تراکم بالای رگه‌چه‌های کوارتز و کوارتز- سولفیدی است که گاه به ۶۰ عدد در مترمربع رسیده است. پیریت، کالکوپیریت و به طور فرعی بورنیت و کانیهای زون اکسیدان مانند اکسیدهای آهن ثانویه، مالاکیت، فیروزه و ود مس‌دار، کانی‌سازی دیده شده در این واحد است.

هورنبلند مونزونیت پورفیری بافت پورفیری و گلومروپورفیری با زمینه دانه شکری دارد. فنوکریست‌ها شامل ۱۵-۲۰٪ پلاژیوکلاز تا ۴ میلی متر طول، ۱۰-۱۲٪ فلدسپات پتاسیم تا ۱ میلی متر طول و ۷-۸٪ هورنبلند تا ۳ میلی متر طول است. زمینه سنگ علاوه بر کانیهای نام برده شامل کانیهای فرعی و کانیهای ثانویه مانند کوارتز، سرسیت، کلسیت و کانیهای رسی است. این توده نیز به شدت تحت تاثیر محلول کانه‌دار قرار گرفته و انواع استوک‌ورک همراه با کانیهای اولیه سولفیدی و کانیهای زون اکسیدان- سوپرژن در آن دیده می‌شود.

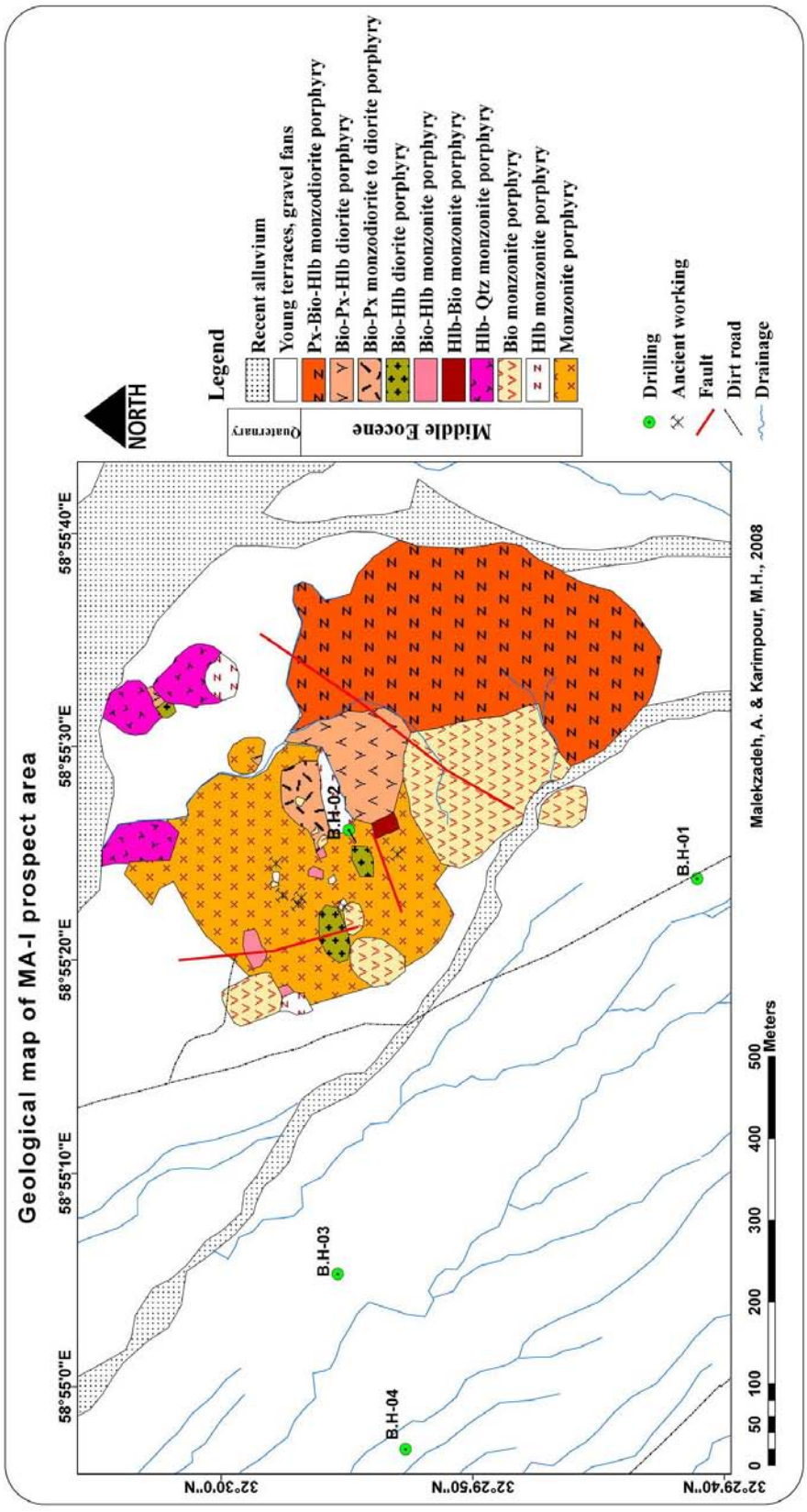
بیوتیت مونزونیت پورفیری دارای ۲۰-۲۵٪ پلاژیوکلاز (۱ تا ۵ میلی متر طول)، ۱۰-۱۱٪ فلدسپات پتاسیم (۱ تا ۵ میلی متر طول)، ۴-۵٪ بیوتیت (۰/۵ تا ۱/۴ میلی متر طول) و ۰/۵-۱٪ کوارتز (۰/۱ تا ۰/۳ میلی متر) به صورت فنوکریست می‌باشد. زمینه سنگ دانه ریز بوده و شامل کانیهای نام برده، فرعی و ثانویه است. فلدسپاتها عمدتاً به سرسیت و کلسیت آلتره شده‌اند. کوارتز ثانویه در متن و در قالب رگه‌چه‌ای دیده می‌شود. در برخی نقاط نیز این واحد تحت تاثیر آلتراسیون پروپلیتیک قرار گرفته و بیوتیت‌ها به کلریت، اپیدوت و کلسیت تجزیه شده‌اند. کانی‌سازی نیز به صورت استوک‌ورک و افشان در آن دیده می‌شود.

هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری که در شمال شرقی ناحیه MA-I رخنمون دارد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه شکری است. فنوکریست‌ها شامل ۱۰-۱۲٪ پلاژیوکلاز با ۱ تا ۴ میلی متر طول، ۸-۹٪ فلدسپات پتاسیم تا ۱ میلی متر طول، ۲-۳٪ کوارتز تا ۱/۵ میلی متر طول و ۱-۳٪ هورنبلند تا ۳ میلی متر طول است. فلدسپات‌ها عمدتا به سرسیت، کلسیت و کانی‌ر سی تجزیه شده‌اند. هورنبلندها نیز به اکسید آهن تبدیل گشته‌اند. کوارتز ثانویه نیز در متن سنگ دیده می‌شود. این واحد نیز تحت تاثیر کانی‌سازی قرار گرفته و غالباً قالب پیریت‌های اکسید شده به صورت افشان در آن قابل مشاهده است.

هورنبلند بیوتیت مونزونیت پورفیری که در مرکز ناحیه رخنمون دارد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه درشت است. این واحد شامل حدود ۴۵٪ فنوکریست است که عبارتند از: ۲۰-۲۵٪ پلاژیوکلاز (کمتر از ۶ میلی متر طول)، ۸-۱۰٪ فلدسپات پتاسیم (کمتر از ۲ میلی متر طول)، ۷-۸٪ بیوتیت (کمتر از ۲ میلی متر طول) و ۱-۳٪ هورنبلند (کمتر از ۲ میلی متر طول). زمینه سنگ غالباً فلدسپات آلتره شده است. این واحد اغلب تحت تاثیر آلتراسیون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت قرار گرفته که در نتیجه آن فلدسپات‌ها به سرسیت، کلسیت و کانی رسی تجزیه شده‌اند. رگه‌چه‌های کوارتز و کوارتز- سولفیدی در آن دیده می‌شود. در بخشهایی که آلتراسیون پروپلیتیک غالب است، بیوتیت و هورنبلند به کلریت و اپیدوت آلتره شده‌اند.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه اکتشافی مس- طلا پورفیری ماهرآباد [۲۵]



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی MA-I [۲۵]

بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری رخنمون اندکی در ناحیه MA-I دارد. این توده شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (۱۰-۱۲٪) تا ۳ میلی متر طول، فلدسپات پتاسیم (۱۰-۱۲٪) تا ۱ میلی متر طول، هورنبلند (۳-۴٪) تا ۳ میلی متر طول، بیوتیت (۲-۳٪) تا ۰/۹ میلی متر طول و به ندرت کوارتز (کمتر از ۰/۵٪) تا ۰/۴ میلی متر طول در یک زمینه دانه ریز است. زمینه سنگ شامل فلدسپات، کوارتز، بیوتیت، هورنبلند، کانی فرعی و کانیهای ثانویه است. آلتراسیون مشاهده شده در این واحد کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت است. کانی‌سازی در قالب استوک‌ورک و افشان نیز دیده می‌شود.

بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری بافت پورفیری تا گلومروپورفیری با زمینه دانه شکری دارد. حدود ۴۰ تا ۴۵٪ فنوکریست در این واحد دیده می‌شود که شامل ۲۵-۲۷٪ پلاژیوکلاز تا ۲ میلی متر طول، ۱-۲٪ فلدسپات پتاسیم تا ۰/۴ میلی متر طول، تا ۱۰٪ هورنبلند تا ۲ میلی متر طول، ۲-۵٪ بیوتیت تا ۱ میلی متر طول و کمتر از ۱٪ کوارتز است. این سنگ تحت تاثیر آلتراسیونهای کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و پروپلیتیک در قسمتهای مختلف قرار گرفته و تراکم بالایی از رگه چه‌های کوارتز- سولفیدی همراه با زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در آن دیده می‌شود.

بیوتیت پیروکسن مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری شامل ۳۰٪ فنوکریست در زمینه دانه متوسط است. فنوکریست‌ها عبارتند از: پلاژیوکلاز (۱ تا ۳ میلیمتر طول)، فلدسپات پتاسیم (۱ تا ۳ میلیمتر طول)، دیوپسید تا اوژیت- دیوپسیدی (تا ۱ میلیمتر طول) و بیوتیت (تا ۱/۵ میلیمتر طول). این توده تحت تاثیر آلتراسیون سیلیسی- پروپلیتیک قرار گرفته که در نتیجه آن بیوتیت توسط کلریت و فلدسپات‌ها به وسیله کلسیت و فرعی سرسیت جایگزین شده‌اند. کوارتز ثانویه و پیریت در قالب رگه چه و افشان دیده می‌شود.

بیوتیت پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری بافت پورفیری با زمینه دانه شکری دارد. حدود ۳۵٪ فنوکریست شامل ۲۵-۳۰٪ پلاژیوکلاز (تا ۳ میلی متر طول)، ۱-۲٪ فلدسپات پتاسیم (تا ۱ میلی متر طول)، ۲-۳٪ هورنبلند (تا ۳ میلی متر طول)، ۱-۲٪ پیروکسن (دیوپسید تا اوژیت- دیوپسیدی، تا ۱ میلی متر طول) و ۱٪ بیوتیت (تا ۲ میلی متر طول) دیده می‌شود. این واحد تحت تاثیر آلتراسیون پروپلیتیک نسبتاً ضعیفی قرار گرفته و کمی کلریت، اپیدوت و کوارتز کانیهای ثانویه آن را تشکیل می‌دهد.

پیروکسن بیوتیت هورنبلند مونزودیوریت پورفیری که در شرق محدوده MA-I رخنمون دارد، شامل ۳۵-۴۰٪ فنوکریست متشکل از پلاژیوکلاز (کمتر از ۴ میلی متر طول)، فلدسپات پتاسیم (کمتر از ۳ میلی متر طول)، هورنبلند (تا ۳ میلیمتر طول)، بیوتیت (کمتر از ۴ میلی متر طول) و پیروکسن (تا ۲ میلی متر طول) در زمینه دانه متوسط است. این سنگ بسیار ضعیف تحت تاثیر آلتراسیون پروپلیتیک قرار گرفته و به ندرت کلریت در آن قابل مشاهده است.

آلتراسیون

منطقه اکتشافی ماهرآباد به شدت تحت تاثیر آلتراسیون قرار گرفته است. پردازش داده‌های ماهواره‌ای به روشهای مختلف، آلتراسیون وسیع منطقه را به خوبی بارزسازی می‌کند [۲۵]. گسترش آلتراسیون رابطه مستقیم با گسترش توده‌های نفوذی دارد.

زون‌های آلتراسیون در منطقه اکتشافی ماهرآباد شامل زون‌های پتاسیک، سرسیتیک- پتاسیک، کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، کوارتز- کربنات- پیریت، سیلیسی- پروپلیتیک، سیلیسی، پروپلیتیک و کربناته بوده که در مطالعات سطحی و زیرسطحی مشخص شده است. در سطح محدوده MA-I آلتراسیون‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت با شدت بیش از ۵۰ درصد، سیلیسی- پروپلیتیک با شدت بین ۳۰ تا ۵۰ درصد و پروپلیتیک ضعیف (شرق منطقه) با شدت کمتر از ۲۰ درصد حجم سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۵)[۲۵].

آلتراسیون غالب در MA-I زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت است که واحدهای مونزونیتی و توده بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری را تحت تاثیر قرار داده است. این زون در صحرا با رنگ زرد روشن مایل به کمی قهوه‌ای به علت حضور اکسیدهای آهن ثانویه حاصل از اکسیده شدن سولفیدها در سطح زمین مشخص می‌شود. مهمترین کانی این آلتراسیون کوارتز است که در قالب رگه‌چه و یا در متن سنگ مشاهده می‌گردد. مقدار آن از کمتر از ۱۰ درصد تا بیش از ۷۰ درصد متفاوت است. سرسیت که حاصل آلتره شدن فلدسپاتها بوده از کمتر از ۱ درصد تا ۲۰ درصد متغیر می‌باشد. پیریت به عنوان مهمترین کانی سولفیدی این زون عمدتاً در رگه‌چه‌هاست و تا

۶ درصد می‌رسد که غالباً در سطح زمین به گوتیت و گاه ژاروسیت تبدیل شده است. کالکوپیریت دومین کانی سولفیدی مهم این زون است که در سطح زمین اغلب به اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده است. بیشترین تراکم رگه‌چه‌های کانی‌سازی در این زون مشاهده می‌شود که بعضاً تا بیش از ۶۰ رگه‌چه در مترمربع می‌رسد. عرض رگه‌چه‌ها نیز از کمتر از ۱ میلی متر تا بیش از ۳ سانتی متر متغیر است [۲۵].

آلتراسیون سیلیسی- پروپلیتیک عمدتاً در واحد بیوتیت پیوکسن مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری دیده می‌شود. این زون در صحرا با رنگ سبز به علت حضور کانیهایی مثل کلریت و اپیدوت و وجود رگه چه‌های کوارتز- سولفیدی ظریف مشخص می‌شود. اولین کانی مهم این زون کوارتز است که به صورت رگه چه و یا در متن سنگ مشاهده می‌شود. مقدار آن از ۲ تا ۱۵ درصد متغیر است. کلریت دومین کانی مهم است که فراوانی آن تا ۴ درصد می‌رسد. کلسیت تا ۳ درصد، اپیدوت کمتر از ۲ درصد و مقادیر جزئی سرسیت دیگر کانیهای ثانویه این زون هستند. کلریت، اپیدوت و کلسیت عمدتاً حاصل آلتره شدن کانیهای آهن و منیزیم‌دار مثل هورنبلند و بیوتیت و کمتر پلاژیوکلازهاست. کانیهای فلزی این زون عمدتاً مگنتیت (کمتر از ۱ درصد) و پیریت (کمتر از ۲ درصد) است. تراکم رگه‌چه‌ها در این بخش حداکثر به ۵ رگه چه در مترمربع می‌رسد و ضخامت آنها از ۳ میلی متر کمتر است [۲۵].

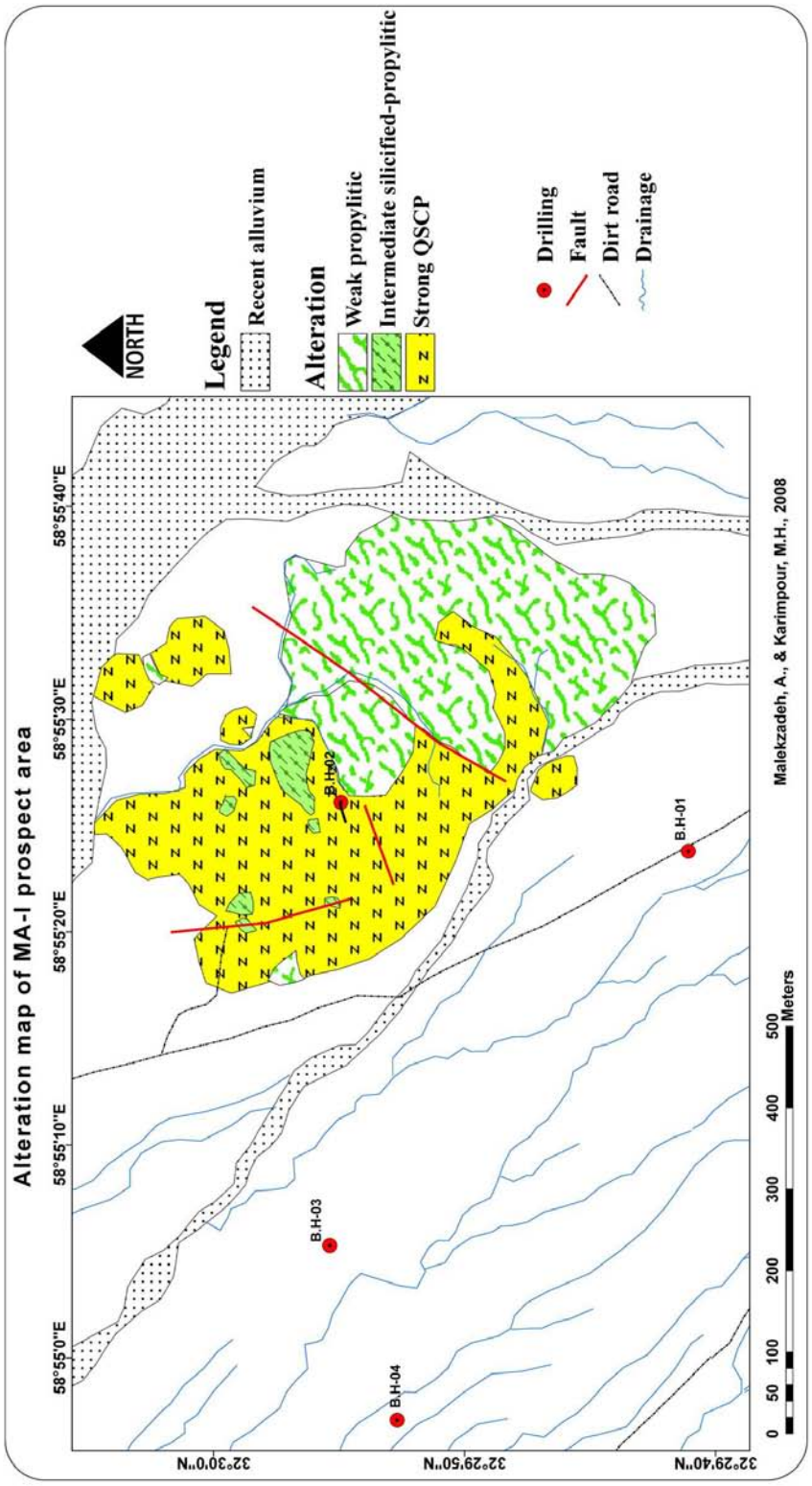
آلتراسیون پروپلیتیک ضعیف در توده پیروکسن بیوتیت هورنبلند مونزودیوریت پورفیری و بیوتیت پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری در شرق محدوده MA-I دیده می‌شود. کانیهای اصلی این زون شامل جزئی کلریت، کلسیت و مگنتیت است. عمده این کانیها حاصل آلتره شدن کانیهای آهن و منیزیم‌دار می‌باشد. کانی‌سازی چه به صورت رگه‌چه‌ای و چه به صورت پراکنده در این زون دیده نمی‌شود [۲۵].

کانی‌سازی- ژئوشیمی

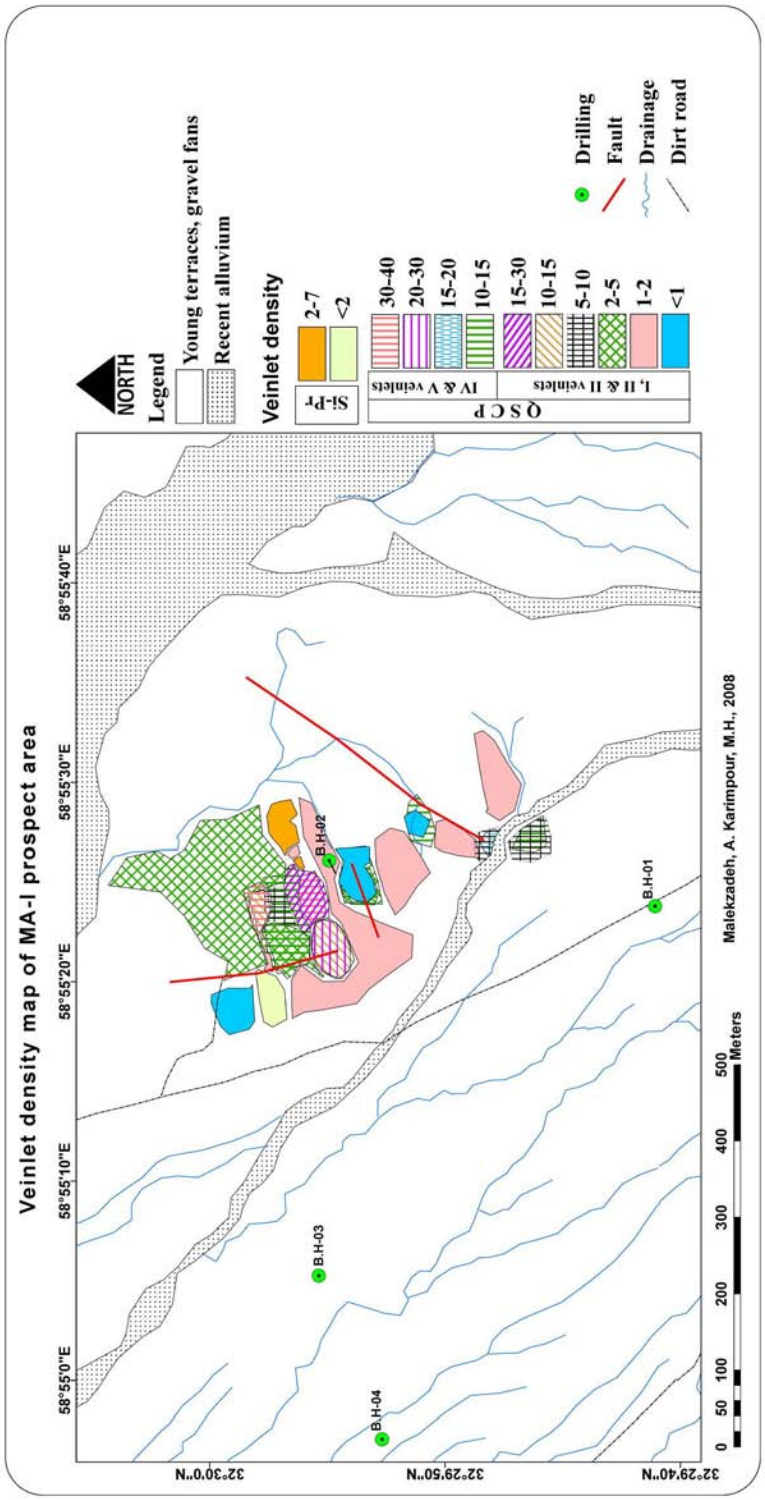
کانی‌سازی مس- طلا پورفیری ماهرآباد عمدتاً در محدوده‌های اکتشافی MA-I تا MA-III به وسعت تقریبی ۱۲ کیلومتر مربع مشاهده می‌گردد. مطالعات زیرسطحی نشان می‌دهد که این سه منطقه در زیر آبرفت با یکدیگر در ارتباطند. کانیهای سولفیدی مهم هیپوژن شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و به طور فرعی اسفالریت و گالن است. بیش از ۸۵ درصد این کانیها درسطح به اکسیدهای آهن ثانویه مانند هماتیت، گوتیت و ژاروسیت تبدیل شده‌اند. مالاکیت، فیروزه و ود مس‌دار نیز کانیهای دیگر زون اکسیدان هستند که در نقاط مختلف مشاهده می‌شوند. کانی‌سازی در محدوده MA-I به سه حالت وجود دارد که عبارت است از: استوک‌ورک، پراکنده و رگه‌ای. بخش عمده کانیهای سولفیدی در زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و مقدار اندکی از آن در زون سیلیسی- پروپلیتیک دیده می‌شود که اغلب در مطالعات زیرسطحی تشخیص داده شده‌اند [۲۵].

کانی‌سازی استوک‌ورک مهمترین بافت کانی‌سازی در کل منطقه اکتشافی ماهرآباد است. نقشه تراکم رگه‌چه‌ها به تفکیک زون‌های آلتراسیون در سطح منطقه MA-I تهیه شد (شکل ۶). رگه‌چه‌های کوارتز- سولفیدی با تراکم بسیار بالا (حداکثر ۶۰ رگه‌چه در مترمربع) در سطح زمین به وضوح قابل مشاهده‌اند. بخش عمده این رگه‌چه‌ها در زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و به مقدار بسیار کمتر در زون سیلیسی- پروپلیتیک حضور دارند (شکل ۶). در مطالعات زیرسطحی نیز حداکثر تا ۳۰ رگه‌چه در متر در آلتراسیون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت تشخیص داده شد. در زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت ۵ نوع رگه چه براساس ترکیب کانی‌شناسی و ترادف پاراژنتیکی تفکیک شد که عبارتند از: ۱) کوارتز، ۲) کوارتز- پیریت، ۳) کوارتز- کربنات- پیریت، ۴) کوارتز- کربنات- پیریت ± کالکوپیریت ± بورنیت ± اسفالریت ± گالن، و ۵) کربنات- پیریت ± کالکوپیریت ± بورنیت ± اسفالریت ± گالن ± کوارتز. ضخامت این رگه‌چه‌ها از کمتر از ۱ میلی متر تا بیش از ۴ سانتی متر متغیر است. ضخامت از رگه‌چه شماره ۱ به طرف رگه‌چه شماره ۴ (رگه‌چه‌های جوانتر) افزایش می‌یابد. اما رگه‌چه عمدتاً سولفیدی شماره ۵ معمولاً کمتر از ۳ میلی متر ضخامت دارد. تراکم رگه‌چه‌های ۱ تا ۳ در سطح از کمتر از ۱ تا ۳۰ رگه‌چه در مترمربع متغیر است. رگه‌چه شماره ۴ و ۵ در سطح نیز بیشترین تراکم را در مرکز منطقه (محل ترانشه‌ها) دارد که به ۴۰ رگه‌چه در مترمربع می‌رسد (شکل ۶). پیریت مهمترین کانی سولفیدی در رگه‌چه‌هاست. پیریت‌ها عمدتاً شکل‌دار تا نیمه شکل‌دارند. اندازه آنها از کمتر از ۵۰ میکرون تا بیش از ۶۰۰ میکرون متغیر است. این کانی از ۰/۲ تا بیش از ۶۰ درصد کل رگه‌چه را تشکیل می‌دهد. کالکوپیریت

بین ۵ تا ۱۰ درصد، بورنیت و اسفالریت در حد ۱ تا ۲ درصد و گالن کمتر از ۰/۵ درصد در رگه‌چه‌ها دیده می‌شود [۲۵].



شکل ۵، نقشه آلتراسیون محدوده اکتشافی MA-I [۲۵]



شکل ۶. نقشه تراکم رگچه محدوده اکتشافی MA-I [۲۵]

تراکم رگه‌چه‌ها در زون سیلیسی- پروپلیتیک از کمتر از ۲ تا ۷ رگه‌چه در مترمربع متغیر است (شکل ۶). این رگه‌چه‌ها براساس ترکیب کانی‌شناسی به ۸ نوع رگه‌چه قابل تفکیک‌اند: ۱- کوارتز- پیریت ± کالکوپیریت، ۲- کوارتز- مگنتیت، ۳- کوارتز- کربنات- پیریت، ۴- کوارتز- پیریت- کربنات- کلریت، ۵- کوارتز- مگنتیت- کلریت، ۶- کوارتز- کلریت- مگنتیت- اپیدوت، ۷- کوارتز-کربنات- مگنتیت- کلریت، و ۸- کربنات- پیریت. پیریت ۱۰ تا ۳۵ درصد و کالکوپیریت کمتر از ۱ درصد در رگچه‌ها متغیر است. مقدار مگنتیت در رگچه تا ۲۰ درصد می‌رسد [۲۵].

کانی‌سازی سولفیدی پراکنده (افشان)، در زون‌های آلتراسیون کوارتز- سرسیت- پیریت و سیلیسی- پروپلیتیک مشاهده می‌شود و عمدتاً شامل پیریت و کمی کالکوپیریت (تا ۳ درصد) است. کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز- پیریت (که معرف آخرین فعالیتهای محلولهای هیدروترمالی در ناحیه هستند) دارای پیریت‌های ریزدانه (تا ۲۰۰ میکرون) پراکنده تا ۰/۵ درصد هستند [۲۵]. براساس نتایج اکتشافات ژئوشیمی اولیه، مس بین ۱۷۹ تا ۶۸۳۰ گرم در تن (میانگین ۳۲۰۰ گرم در تن) و طلا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در تن (میانگین ۵۷۰ میلی‌گرم در تن) وجود دارد. بخش اصلی مس و طلا در آلتراسیون‌های پتاسیک و کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در گمانه‌ها تشخیص داده شد [۲۵].

سن‌سنجی

براساس مطالعات پترولوژیکی، پورفیریهای مرتبط با کانی‌سازی مس- طلا پورفیری ماهرآباد، توده‌های نفوذی نوع I، متاآلومینوس، کالک آلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی هستند که در رژیم تکتونیکی جزایر قوسی تشکیل شده‌اند. این سنگها با میانگین ویژگیهای ژئوشیمیایی SiO_2> ٪۵۹، Al_2O_3 > ٪۱۵، MgO < ٪۲، Na_2O > ٪۳، Sr > ۸۷۰ ppm، Y <۱۸ ppm، Yb < ۱/۹۲ ppm؛ Sr/Y > ۵۵، LREE متوسط، به طور نسبی HREE کم، غنی شدگی عناصر LILE (Sr، Cs، Rb، K و Ba) و نسبت به عناصر HFSE (Nb، Ta، Ti، Hf و Zr) مشخص می‌شوند [۲۶].

از آن جایی که توده‌های مونزونیتی منشأ اصلی کانی‌سازی در ماهرآباد هستند و تعیین سن تبلور آنها به منزله تعیین سن کانی‌سازی مس پورفیری است، دو نمونه از این توده‌ها از محدوده اکتشافی MA-I برای سن‌سنجی انتخاب شدند.

نتایج آنالیز سن‌سنجی نمونه هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری با آلتراسیون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت (MA-90) و بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری با آلتراسیون سیلیسی- پروپلیتیک (MA-64) در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین نمودارهای کنکوردیای $^{206}Pb/^{238}U$ در مقابل $^{207}Pb/^{235}U$ و هیستوگرام تعیین سن میانگین دو نمونه در شکلهای (a و b ۷ و a و b ۸) نشان داده شده است.

سن توده هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری (۲۵ نقطه آنالیز) ۰/۸ ±۳۹ میلیون سال و توده بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری ۰/۸ ± ۳۸/۳ میلیون سال به دست آمد (جدول ۱ و شکلهای ۷ و ۸). از طرفی نسبت U/Th در زیرکان، یک وسیله مناسب برای تعیین پتروژنز است، زیرا به طور معمول در زیرکان‌های دگرگونی نسبت U/Th بیش از ۵ تا ۱۰ و در زیرکان‌های آذرین کمتر از ۵ تا ۱۰ می‌باشد [۲۷-۲۹]. این نسبت در زیرکان‌های مطالعه شده کمتر از ۲ بوده که نشان دهنده ماهیت ماگماتیکی زیرکان‌هاست. این ویژگی همراه با خصوصیت حرارت خاتمه بالای زیرکان [۳۰] به ما اجازه می‌دهد تا اطلاعات U-Pb به دست آمده را نماینده سن تبلور توده آذرین بدانیم.

در شکل (۹) سن نسبی توده‌های مهم مرتبط با فاز اصلی کانی‌سازی در منطقه اکتشافی ماهرآباد که حاصل مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است و نیز سن مطلق دو توده آنالیز شده نشان داده شده است. توده هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری با آلتراسیون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و کانی‌سازی استوک‌ورک و افشان یکی از توده‌های مونزونیتی مهم منطقه اکتشافی ماهرآباد است که هم در سطح و هم در گمانه‌ها دیده شده است. این توده همزمان با بخشی از کانی‌سازی منطقه تشکیل شده، بنابراین سن به دست آمده برای تبلور آن (حدود ۳۹ میلیون سال) به نوعی سن کانی‌سازی را آشکار می‌کند. از طرفی سن تبلور توده بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری (حدود ۳۸ میلیون سال) با آلتراسیون سیلیسی- پروپلیتیک و بعضاً کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و کانی‌سازی استوک‌ورک و افشان تشکیل بخش دیگری از کانی‌سازی را در آن زمان نشان می‌دهد. در همه کانسارهای

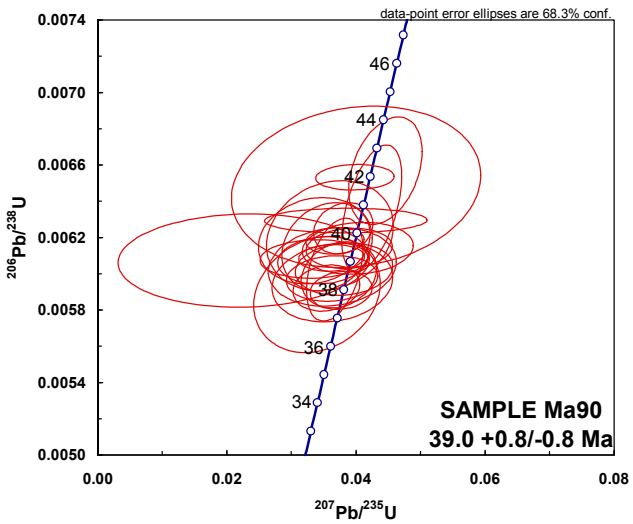
ماگمایی- گرمابی، کانی‌سازی به طور دوره‌ای در چند مرحله و در فاصله حدود ۳ تا ۴ میلیون سال انجام می‌شود. اختلاف سنی توده‌های مذکور نشان می‌دهد که دست کم به مدت یک میلیون سال ورود محلول کانه‌دار همراه با تبلور و نفوذ توده‌های مختلف در منطقه در جریان بوده است.

جدول ۱. نتایج آنالیز سن‌سنجی دو نمونه از توده‌های مونزونیتی منطقه اکتشافی ماهرآباد (نمونه MA-64)

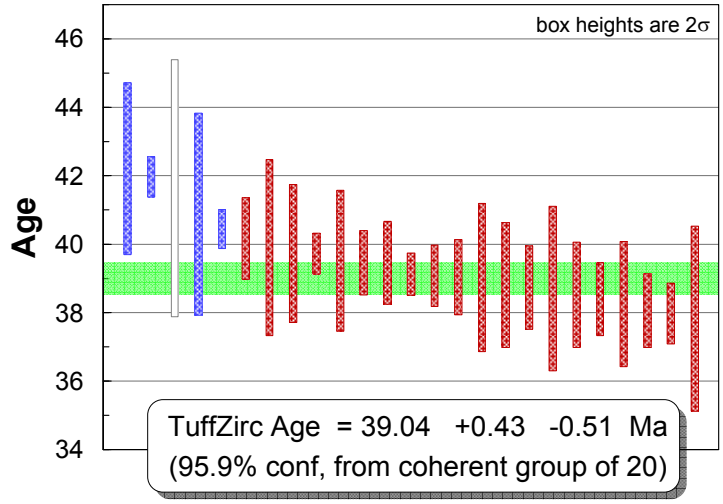
شماره نمونه	U (ppm)	$^{206}Pb/^{204}Pb$	U/Th	$^{206}Pb^*/^{207}Pb^*$	± (%)	$^{207}Pb^*/^{235}U^*$	± (%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	± (%)	Best Age (Ma)	± (Ma)
64-1	۶۴۹	۵۲۰۸	۱/۳	۲۲/۲۱۹۶	۴/۸	۰/۰۳۶۷	۵/۴	۰/۰۰۵۹	۲/۶	۳۸/۰	۱/۰
64-2	۲۸۹	۱۵۰۸	۱/۵	۲۰/۶۰۴۷	۲۹/۹	۰/۰۳۹۴	۳۰/۰	۰/۰۰۵۹	۳/۰	۳۷/۹	۱/۱
64-3	۳۷۲	۴۰۶۰	۱/۳	۲۱/۸۲۰۲	۱۱/۷	۰/۰۳۷۰	۱۲/۱	۰/۰۰۵۸	۳/۳	۳۷/۶	۱/۲
64-4	۴۵۹	۵۱۸۸	۱/۸	۲۳/۶۳۹۱	۱۱/۷	۰/۰۳۴۴	۱۲/۲	۰/۰۰۵۹	۳/۴	۳۷/۹	۱/۳
64-5	۲۷۹	۷۷۶	۱/۳	۱۶/۰۱۸۴	۲۵/۷	۰/۰۶۰۷	۲۵/۸	۰/۰۰۷۰	½	۴۵/۳	۰/۹
64-6	۶۲۸	۲۸۲۴	۱/۰	۱۸/۰۰۴۶	۱۲/۱	۰/۰۴۶۶	۱۲/۳	۰/۰۰۶۱	½	۳۹/۱	۰/۸
64-7	۴۸۴	۵۶۰۰	۱/۷	۲۰/۲۲۹۲	۱۰/۴	۰/۰۴۰۵	۱۱/۴	۰/۰۰۵۹	۴/۶	۳۸/۲	۱/۸
64-8	۴۴۲	۴۷۸۰	۱/۱	۲۰/۵۲۰۸	۱۲/۸	۰/۰۳۹۴	۱۳/۲	۰/۰۰۵۹	۳/۱	۳۷/۷	۱/۲
64-9	۵۵۰	۵۲۴۸	۱/۴	۲۰/۷۹۲۱	۱۳/۵	۰/۰۳۹۶	۱۴/۱	۰/۰۰۶۰	۴/۰	۳۸/۴	۱/۵
64-10	۳۶۴	۲۸۹۶	۱/۴	۲۱/۵۹۰۱	۳۰/۳	۰/۰۳۷۳	۳۰/۸	۰/۰۰۵۸	۵/۴	۳۷/۶	۲/۰
64-11	۲۴۰	۸۲۴	۱/۲	۱۸/۷۶۹۳	۳۸/۷	۰/۰۵۰۵	۳۸/۸	۰/۰۰۶۹	۲/۷	۴۴/۱	۱/۲
64-12	۳۹۹	۵۴۹۶	۱/۸	۱۸/۳۱۱۱	۶/۱	۰/۰۴۴۱	۷/۱	۰/۰۰۵۹	۳/۵	۳۷/۶	۱/۳
64-13	۸۳۳	۸۵۹۲	۱/۸	۲۰/۷۵۰۹	۸/۱	۰/۰۳۹۴	۸/۴	۰/۰۰۵۹	۱/۹	۳۸/۱	۰/۷
64-14	۴۱۹	۳۶۰۴	۱/۷	۱۸/۴۳۴۰	۸/۴	۰/۰۴۴۷	۸/۷	۰/۰۰۶۰	۲/۴	۳۸/۴	۰/۹
64-15	۵۳۱	۶۸۲۴	۱/۸	۲۱/۱۸۹۰	۸/۶	۰/۰۳۸۷	۹/۳	۰/۰۰۵۹	۳/۵	۳۸/۲	۱/۳
64-16	۴۴۰	۳۹۲۴	۱/۶	۲۰/۳۵۰۲	۱۱/۲	۰/۰۴۱۱	۱۱/۳	۰/۰۰۶۱	۱/۷	۳۹/۰	۰/۶
64-17	۷۰۴	۴۷۰۴	۱/۵	۱۹/۹۲۷۸	۵/۲	۰/۰۴۱۲	۵/۹	۰/۰۰۶۰	۳/۰	۳۸/۳	۱/۱
64-18	۴۲۴	۳۱۹۲	۱/۳	۲۰/۹۳۴۸	۱۰/۵	۰/۰۴۰۱	۱۰/۵	۰/۰۰۶۱	۰/۹	۳۹/۱	۰/۳
64-19	۵۲۲	۲۸۲۴	۱/۰	۲۰/۲۲۸۸	۶/۹	۰/۰۴۰۶	۷/۱	۰/۰۰۶۰	۱/۷	۳۸/۳	۰/۷
64-20	۴۹۶	۳۴۷۲	۱/۵	۲۰/۴۰۸۹	۸/۱	۰/۰۴۰۱	۸/۶	۰/۰۰۵۹	۳/۰	۳۸/۱	۱/۱

ادامه جدول (۱) نتایج آنالیز سن‌سنجی نمونه از توده‌های مونزونیتی منطقه اکتشافی ماهرآباد (نمونه MA-90)

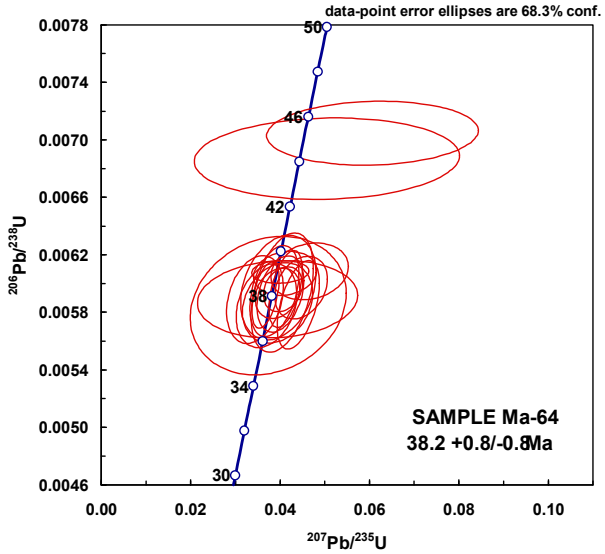
شماره نمونه	U (ppm)	$^{206}Pb/^{204}Pb$	U/Th	$^{206}Pb^*/^{207}Pb^*$	± (%)	$^{207}Pb^*/^{235}U^*$	± (%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	± (%)	Best Age (Ma)	± (Ma)
90-1	۳۵۳	۱۶۰۰	۱/۳	۲۱/۰۱۵۴	۱۴/۰	۰/۰۴۰۳	۱۴/۱	۰/۰۰۶۱	۱/۵	۳۹/۵	۰/۶
90-2	۴۲۱	۲۷۸۲	۱/۱	۲۲/۱۰۹۳	۱۰/۱	۰/۰۳۷۴	۱۰/۳	۰/۰۰۶۰	۲/۰	۳۸/۵	۰/۸
90-3	۳۸۵	۲۲۵۰	۱/۴	۲۲/۵۷۳۶	۱۶/۸	۰/۰۳۶۳	۱۷/۰	۰/۰۰۶۰	۲/۴	۳۸/۲	۰/۹
90-4	۷۹۸	۱۸۰۲	۱/۱	۲۰/۶۶۹۵	۶/۳	۰/۰۴۲۴	۷/۲	۰/۰۰۶۴	۳/۶	۴۰/۹	۱/۵
90-5	۱۵۰	۸۰۲	۱/۵	۳۷/۰۴۲۰	۵۶/۸	۰/۰۲۲۶	۵۶/۹	۰/۰۰۶۱	۲/۸	۳۹/۰	۱/۱
90-6	۳۹۳	۱۸۵۸	۱/۴	۲۲/۵۹۹۵	۱۰/۰	۰/۰۳۹۹	۱۰/۱	۰/۰۰۶۵	۰/۷	۴۲/۰	۰/۳
90-7	۲۰۴	۱۷۳۲	۱/۳	۲۳/۷۹۴۸	۱۷/۷	۰/۰۳۶۰	۱۸/۰	۰/۰۰۶۲	۳/۲	۳۹/۹	۱/۳
90-8	۲۶۵	۱۶۳۰	۱/۰	۲۳/۱۷۱۰	۹/۳	۰/۰۳۶۲	۹/۳	۰/۰۰۶۱	۰/۸	۳۹/۱	۰/۳
90-9	۵۵۸	۲۸۴۴	۰/۹	۲۱/۷۷۰۵	۱۳/۰	۰/۰۳۸۲	۱۳/۱	۰/۰۰۶۰	۱/۶	۳۸/۷	۰/۶
90-10	۵۳۱	۲۸۶۰	۰/۹	۲۱/۵۹۴۳	۸/۳	۰/۰۳۷۷	۸/۴	۰/۰۰۵۹	۱/۲	۳۸/۰	۰/۴
90-11	۴۴۷	۲۰۱۶	۱/۲	۲۲/۶۹۷۵	۱۲/۸	۰/۰۳۶۳	۱۲/۹	۰/۰۰۶۰	۱/۴	۳۸/۴	۰/۵
90-12	۲۹۱	۲۱۲۰	۱/۴	۲۲/۵۹۴۰	۲۱/۶	۰/۰۳۸۴	۲۱/۶	۰/۰۰۶۳	۰/۷	۴۰/۴	۰/۳
90-13	۵۶۹	۴۱۳۴	۱/۶	۲۲/۶۴۹۹	۷/۸	۰/۰۳۸۱	۸/۰	۰/۰۰۶۳	۱/۵	۴۰/۲	۰/۶
90-14	۴۸۲	۲۲۶۰	۱/۴	۲۳/۸۹۱۸	۱۸/۷	۰/۰۳۴۰	۱۹/۰	۰/۰۰۵۹	۳/۶	۳۷/۸	۱/۴
90-15	۳۶۵	۲۲۱۴	۱/۴	۲۲/۹۱۰۳	۱۷/۹	۰/۰۳۶۳	۱۸/۰	۰/۰۰۶۰	۲/۴	۳۸/۸	۰/۹
90-17	۲۵۹	۱۴۴۶	۱/۴	۲۵/۰۱۶۶	۱۵/۶	۰/۰۳۳۵	۱۶/۵	۰/۰۰۶۱	۱/۲	۳۹/۱	۰/۴
90-18	۳۹۶	۲۶۳۰	۱/۱	۲۲/۶۲۰۶	۷/۲	۰/۰۳۶۷	۷/۸	۰/۰۰۶۰	۳/۱	۳۸/۷	۱/۲
90-19	۳۱۵	۱۴۳۴	۱/۲	۲۵/۳۹۹۹	۱۶/۹	۰/۰۳۳۶	۱۷/۰	۰/۰۰۶۲	۲/۵	۳۹/۷	۱/۰
90-20	۲۷۹	۱۴۳۶	۱/۰	۲۲/۳۱۲۳	۳۱/۵	۰/۰۴۰۰	۳۱/۸	۰/۰۰۶۵	۴/۵	۴۱/۶	۱/۹
90-20A	۳۸۰	۲۲۸۶	۲/۰	۲۴/۰۳۰۸	۱۳/۱	۰/۰۳۴۹	۱۳/۲	۰/۰۰۶۱	۱/۴	۳۹/۰	۰/۵
90-21	۶۲۷	۳۰۴۲	۱/۲	۲۳/۰۲۹۵	۹/۵	۰/۰۳۵۵	۹/۶	۰/۰۰۵۹	۱/۴	۳۸/۱	۰/۵
90-22	۴۵۱	۲۴۶۲	۱/۳	۲۳/۸۶۵۰	۱۲/۸	۰/۰۳۵۵	۱۳/۰	۰/۰۰۶۱	۲/۶	۳۹/۵	۱/۰
90-23	۳۲۶	۱۶۹۸	۱/۴	۲۳/۱۸۹۹	۸/۱	۰/۰۳۶۸	۸/۱	۰/۰۰۶۲	۰/۸	۳۹/۷	۰/۳
90-24	۲۲۵	۷۳۶	۱/۳	۲۰/۳۱۶۹	۷/۹	۰/۰۴۴۶	۸/۴	۰/۰۰۶۶	۳/۰	۴۲/۲	۱/۳
90-25	۵۰۳	۳۰۰۸	۱/۱	۲۱/۷۴۰۸	۱۱/۲	۰/۰۳۸۹	۱۱/۳	۰/۰۰۶۱	۱/۲	۳۹/۵	۰/۵



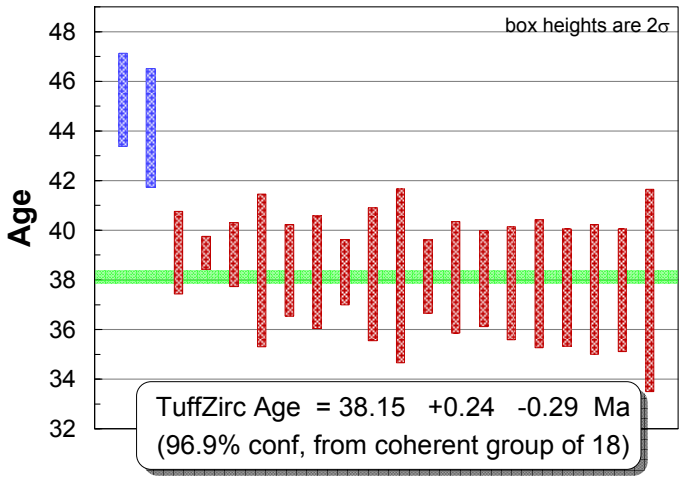
شکل a ۷.پلات کنکوردیای ترا و واسربرگ (۱۹۷۲) از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb برای نمونه هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری (Ma-90)



شکل b ۷. پلات میانگین سن تعیین شده از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb برای نمونه هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری (MA-90)



شکل a ۸. پلات کنکوردیای ترا و واسربرگ (۱۹۷۲) از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb برای نمونه بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری (Ma-64)



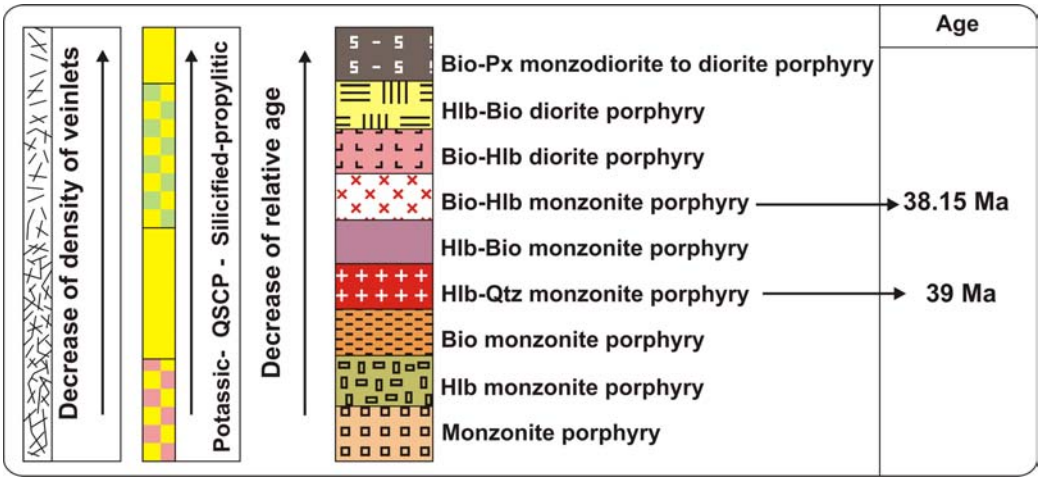
شکل b ۸. پلات میانگین سن تعیین شده از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb برای نمونه بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری (Ma-64)

از طرف دیگر، پیمایشهای صحرایی و مطالعه ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمونه‌های سنگی نشان می‌دهد که توده‌های مونزونیت پورفیری، هورنبلند مونزونیت پورفیری و بیوتیت مونزونیت پورفیری از توده هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری که تعیین سن شده، قدیمیترند. زیرا زینولیت‌هایی از هورنبلند مونزونیت پورفیری و بیوتیت مونزونیت پورفیری در هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری و زینولیت‌هایی از مونزونیت پورفیری در واحد هورنبلند مونزونیت پورفیری دیده شده است. آلتراسیون حرارت بالای پتاسیک که اولین آلتراسیون تشکیل شده توسط سیال ماگمایی – گرمابی است و بخش اصلی زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت عمدتاً همراه با سه توده مذکور مشاهده می‌شود. همچنین بالاترین تراکم رگه‌چه‌ها و بخش مهم کانی‌سازی در منطقه اکتشافی ماهرآباد نیز همراه با آنها بوده و از تراکم استوک‌ورک‌ها در واحد هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری کاسته شده است (شکل ۹). بنابراین با عنایت به اختلاف سنی کم دو توده تعیین سن شده شاید بتوان گفت که تبلور و نفوذ توده‌های مونزونیت پورفیری، هورنبلند مونزونیت پورفیری و بیوتیت مونزونیت پورفیری و به تبع آن شروع کانی‌سازی در منطقه مربوط به حدود ۴۰ میلیون سال پیش است.

با توجه به تعیین سنهای انجام شده، مرحله اصلی کانی‌سازی در منطقه اکتشافی ماهرآباد مربوط به ائوسن میانی (آشکوب بارتونین) است. سن متوسط برای نفوذ توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی در منطقه و همچنین کانی‌سازی را می‌توان ۳۹ میلیون سال پیش در نظر گرفت.

ژئوشیمی رادیوایزوتوپ‌های Rb-Sr & Sm-Nd

دو نمونه از توده‌های نفوذی منطقه براساس مطالعات پتروگرافی و نتایج تجزیه عناصر اصلی، جزئی و قلیایی خاکی که فاقد آلتراسیون بودند برای رادیوایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه کلرادو امریکا تجزیه شدند. نتایج تجزیه این نمونه‌ها در جدولهای (۲ و ۳) گزارش شده است. میزان $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ initial اولیه با توجه به سن ۳۹ میلیون سال محاسبه شد (جدول ۲). میزان $(^{143}Nd/^{144}Nd)i$ اولیه نیز با توجه به سن ۳۹ میلیون سال محاسبه شد (جدول ۳). در نمودار شکل (۱۰) $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ initial و εNd منطقه مطالعاتی و ماگماهای منشأ گرفته از پوسته قاره‌ای و جبه مورد مقایسه قرار گرفتند. منشأ ماگما در منطقه مطالعاتی خارج از پوسته قاره‌ای بوده است.



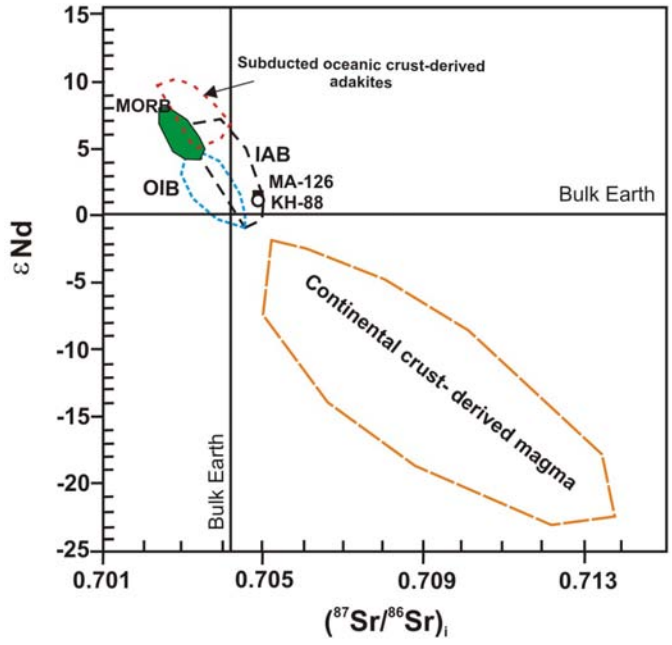
شکل ۹. رابطه سن نسبی توده‌های نفوذی مرتبط با فاز اصلی کانی‌سازی منطقه اکتشافی ماهرآباد براساس روابط صحرایی و آزمایشگاهی همراه با نوع آلتراسیون و تراکم رگه‌چه‌های کوارتز- سولفیدی و تعیین سنهای انجام شده برای دو توده مونزونیتی. با توجه به قدیمیتر بودن توده‌های مونزونیت، هورنبلند مونزونیت و بیوتیت مونزونیت پورفیری نسبت به توده هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری و فاصله سنی دو توده آنالیز شده، شروع کانی‌سازی می‌بایست از حدود ۴۰ میلیون سال پیش باشد.

جدول ۲. نتایج تجزیه Rb-Sr دو توده نفوذی منطقه مطالعاتی

شماره نمونه	سن (MA)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_m(2\alpha)$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_{initial}$	عدم قطعیت در نسبت اولیه
MA-126	۳۹	۴۹/۱	۹۰۶	۰/۱۵۶۵	۰/۷۰۴۹۵(۰)	۰/۷۰۴۸۶۹	۰/۰۰۰۰۰۹
KH-88	۳۹	۶۶/۱	۴۹۳	۰/۳۸۷۳	۰/۷۰۴۹۷(۱)	۰/۷۰۴۷۵۶	۰/۰۰۰۰۱۲

جدول ۳. نتایج تجزیه Sm-Nd دو توده نفوذی منطقه مطالعاتی

شماره نمونه	سن (MA)	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_m(2\alpha)$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{initial}$	εNd
MA-126	۳۹	۴/۲۹	۲۰/۴۵	۰/۱۲۶۹	۰/۵۱۲۷۱۳(۰)	۰/۵۱۲۶۸۱	۱/۸۱
KH-88	۳۹	۲/۴۰	۱۱/۶۳	۰/۱۲۵۱	۰/۵۱۲۶۹۴(۲)	۰/۵۱۲۶۶۲	۱/۴۵



شکل ۱۰. مقایسه میزان $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ initial و εNd در منطقه مطالعاتی با ماگماهای منشأ گرفته از مناطق مختلف زمین

نتیجه‌گیری

براساس حضور توده‌های نفوذی نیمه عمیق کالک آلکالن حدواسط با بافت پورفیری، وسعت و نوع آلتراسیون‌ها، نوع کانی‌سازی شامل استوک‌ورک و افشان، تراکم بالای رگه‌چه‌های کوارتز- سولفیدی و ناهنجاری بالای مس و طلا، منطقه اکتشافی ماهرآباد یک کانی‌سازی مس- طلا پورفیری است. توده‌های مونزونیتی به دلیل همراه بودن با آلتراسیون‌های پتاسیک و کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، تراکم بالای رگه‌چه ها و ناهنجاری بالای مس و طلا توده‌های منشأ اصلی کانی‌سازی مس- طلا پورفیری هستند. تعیین سن تبلور این توده‌ها می‌تواند سن کانی‌سازی منطقه را مشخص کند.

سن‌سنجی لیزر- ابلیشن اورانیوم- سرب روی دو نمونه از توده‌های مونزونیتی نشان می‌دهد که آنها در ۰/۸ ± ۳۹ تا ۰/۸ ± ۳۸/۲ میلیون سال پیش در یک فاصله زمانی کمتر از یک میلیون سال در ائوسن میانی متبلور شده‌اند.

از آن جایی که منطقه اکتشافی ماهرآباد اولین کانی‌سازی مس- طلا پورفیری بلوک لوت است که به طور تفصیلی بررسی شده و سن مطلق کانی‌سازی آن به دست آمده است، تعیین

سن انجام شده می‌تواند اولین سن دقیق را برای دوره کانی-سازیهای نوع پورفیری شرق ایران مشخص می‌کند. همچنین نسبت ایزوتوپ $(^{87}Sr/^{86}Sr)i$ و $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ اولیه با توجه به سن ۳۹ میلیون سال در توده‌های نفوذی مرتبط با کانی-سازی که به ترتیب بین۰/۷۰۴۷ تا ۰/۷۰۴۸ و بین ۰/۵۱۲۶۹۴ تا ۰/۵۱۲۷۱۳ می‌باشد، نشان می‌دهد که منشأ ماگما خارج از پوسته قاره‌ای بوده است. این مطالعه می‌تواند برای بررسی جایگاه تکتونو- ماگماتیکی و تکامل بلوک لوت مورد استفاده قرار گیرد که البته نیاز به مطالعات تکمیلی دارد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق توسط دانشگاه فردوسی مشهد با پژوهه شماره پ/۸۵ به تاریخ ۸۶/۱/۱ حمایت شده است. از جورج گرلز و ویکتور ولنسیا از گروه علوم زمین دانشگاه آریزونا برای انجام آنالیز سن‌سنجی تشکر می‌کنیم.

مراجع

[1] Heaman L. M., Bowins R., Crocket, J. "*The chemical composition of igneous zircon suites: implications for geochemical tracer studies*". Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 1597-1607 (1990).

[2] Wark D.A., Miller C.F. "*Accessory mineral behavior during differentiation of a granite suite: monazite, xenotime and zircon in the Sweetwater Wash pluton, southeastern California, U.S.A*". Chemical Geology, 110: 49-67 (1993).

[3] Bea F. "*Controls on the trace element composition of crustal melts. Transactions of the Royal Society Edinburgh*". Earth Science, 87: 33-41 (1996).

[4] Hoskin P.W.O., Schaltegger U. "*The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis*". In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds) Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 27-62 (2003). DOI: 10.2113/0530027.

[5] Watson E.B. "*Dissolution, growth and survival of zircons during crustal fusion: kinetic principles, geologic models and implications for isotopic inheritance*". Trans. R. Soc. Edinb. Earth Science, 87: 43-56 (1996).

[6] Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. "*Zircon*". Reveiws in Mineralogy and Geochemistry, 53, Mineralogical Society of America, Washington, DC: 500 p (2003).

[7] Mezger K., Krogstad E.J. "*Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: an evaluat*ion". Journal of Metamorphic Geology, 15: 127-140 (1997).

[8] Solar G.S., Pressley R.A., Brown M., Tucker R.D. "*Granite ascent in convergent orogenic belts: testing a modle*". Geology, 26: 711-714 (1998).

[9] Parrish R.R., Noble S.R. "*Zircon U-Th-Pb geochronology by isotope dilution- thermal ionization mass spectrometry (ID-TIMS)*". In Zircon (J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, eds.). Reveiws in Mineralogy and Geochemistry, 53: 183-213 (2003). DOI: 10.2113/0530183.

[10] Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. "*The application of laser ablation-inductively coupled plasma- mass spectrometry to in suit U-Pb zircon geochronology*". Chemical Geology, 211: 47-69 (2004).

[11] Maksaev V., Munizaga F., Fanning M., Palacios C., Tapia J. "*SHRIMP U-Pb dating of the Antucoya porphyry copper deposit: new evidence for an early Cretaceous porphyry-related metallogenic epoch in the Coastal Cordillera of northern Chile*". Mineralium Deposita, 41: 637-644 (2006). DOI:10.1007/s00126-006-0091-5.

[12] Zhao Z.H., Xiong X.L., Wang Q., Wyman D.A., Bao Z.W., Bai Z.H., Qiao Y.L. "*Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China*". Lithos, 102: 374-391 (2008). DOI:10.1016/j.lithos.2007.06.008.

[۱۳] ضیایی م؛ عابدی آ؛ "*کانی‌سازی مس پورفیری در کمربند متالوژنی حاشیه کویر لوت*". یازدهمین کنفرانس بلورشناسی و کانی-شناسی ایران، دانشگاه یزد، (۱۳۸۲) ص ۵۷-۵۹.

[۱۴] خسروی م؛ "*مطالعات پترولوژیکی، آلتراسیون، کانی‌سازی هاله ژئوشیمیایی در منطقه رحیمی (شمال غرب فردوس)*". پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۵) ۲۶۵ صفحه.

[۱۵] کریم‌پور م ،ح؛ "*زونهای آلتراسیون کوارتز حفره‌دار و کوارتز-آلونیت (سولفید زیاد) بخش فوقانی سیستم مس پورفیری منطقه چاه‌شلغمی، جنوب بیرجند*". سیزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۴) صص ۷-۱۱.

[16] Tera F., Wasserburg G.J., "*U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks*". Earth and Planetary Science Letters, (1972)14: 281-304.

[17] Ludwing K.R., "*User,s manual for Isoplot/Ex, version 3.0, a geochronological toolkit for Microsoft Excel*". Berkeley Geochronology Center, CA, spatial publication no.4 (2003)
[18] Tarkian M., Lotfi M., Baumann, A. "*Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran"*. Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran, 51: 357-383 (1983).
[19] Stocklin J., Nabavi M.H. "*Tectonic map of Iran*". Geol. Surv. Iran (1973).
[20] Berberian M. King G.C.P. "*Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran*". Canadian Journal of Earth Science, 18: 210-265 (1981).
[21] Camp V., Griffis R. "*Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran*". Lithous, 15: 221-239 (1982).
[22] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks Chr., Baumann A., Horn P. "*Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran*". Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran, 51: 285-336 (1982).
[23] Tirrul R., Bell I.R., Griffis R.J., Camp V.E. "*The Sistan suture zone of eastern iran*", Geolc. Soc. Am. Bull, 94: 134-156 (1983). DOI: 10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2.
[۲۴] وثیق ح؛ سهیلی م؛ "*نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور (برگه ۷۷۵۴)*". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۴).
[۲۵] ملک‌زاده شفارودی آ؛ "*زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون، ژئوشیمی، میکروترمومتری، مطالعات ایزوتوپی و تعیین منشأ کانی-سازی مناطق اکتشافی ماهرآباد و خوپیک، استان خراسان جنوبی*". رساله دکتری (Ph.D) زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۰۰ صفحه (۱۳۸۸).
[26] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., "*Rb–Sr and Sm–Nd isotopic compositions and Petrogenesis of ore-related intrusive rocks of gold-rich porphyry copper Maherabad prospect area (north of Hanich), east of Iran*". Journal of Crystallography and Mineralogy, 18: 15-32 (2010).
[27] Williams I.S. "*Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia"*. Australian Journal of Earth Sciences, 48: 557-580 (2001). DOI**:** 10.1046/j.1440-0952.2001.00883.x
[28] Rubatto D., Williams I.S., Buick I.S. "*Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range Central Australia*". Contributions to Mineralogy and Petrology, 140: 458-468 (2001).
[29] Rubatto D. "*Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism*". Chemical Geology, 184: 123-138 (2002). PII: S0009-2541(01)00355-2.
[30] Cherniak D.J., Watson E.B. "*Pb diffusion in zircon*". Chemical Geology, 172: 5-24 (2000). DOI:10.1016/S0009-2541(00)00233-3.