

مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی و میانبارهای سیال رخداد کانه‌زایی ییلاق قره‌چی، شمال باختر

اهر، شمال باختر ایران

رزگار فرامرزی^{۱*}، صمد علیپور^۱، علی عابدینی^۱، زهره جبارزاده^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، پست الکترونیکی: Rz_63@yahoo.com

۲- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

چکیده

نشانه معدنی ییلاق قره‌چی به عنوان بخشی از کمربند فلزآیی ارسباران در ۲۵ کیلومتری شمال باختر اهر، استان آذربایجان شرقی، شمال باختر ایران واقع شده است. سنگ‌های درونگیر این نشانه شامل توده‌های نفوذی مرکب با ترکیب سنگ‌شناسی گرانیت، کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت و دیوریت به سن الیگومیوسن می‌باشند. پهنه‌های دگرسانی در این منطقه به طور عمده شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی و کربناته هستند. پیریت کانی سولفیدی عمده درونزاد است که با کانی‌های مگنتیت، کالکوپیریت، مولیبدنیت، اسفالریت و گالن همراهی می‌شود. مهمترین کانی‌های برونزاد در این منطقه شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت هستند که مجموعه کانی‌های درونزاد را همراهی می‌کنند. در بررسی محتویات درونی میانبارهای سیال، پنج نوع میانبار سیال شناسایی شد: تک فاز مایع (L)، تک فاز بخار (V)، دو فاز غنی از مایع (L+V)، دو فاز غنی از بخار (V+L) و چند فاز جامد (L+V+S). دمای همگن شدن میانبارهای سیال مورد بررسی در گستره ۱۹۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند و ذوب آخرین بلور یخ در میانبارهای سیال دو فاز و ذوب هالیت در میانبارهای سیال چند فاز نشان دهنده شوری ۰/۴ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از ریزدماسنجی میانبارهای سیال، جوشش دوره‌ای و رقیق‌شدگی توسط آب‌های زیرزمینی با منشأ جوی سازوکار اصلی در گسترش و تکامل این نشانه محسوب می‌شود. مشخصات و الگوی منطقه‌بندی دگرسانی، کانه‌زایی و میانبارهای سیال بیانگر این است که نشانه معدنی ییلاق قره‌چی دارای بیشترین شباهت با ذخایر مس پورفیری و رگه‌های چند فلزی مرتبط با آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی؛ دگرسانی؛ میانبارهای سیال؛ ییلاق قره‌چی؛ اهر.

Mineralogical, alteration and fluid inclusion studies of the mineralization index at Yeylaghe Gharachi, northwest of Ahar, NW Iran

R. Faramarzi^{1*}, S. Alipour¹, A. Abedini¹, Z. Jabarzadeh²

¹Geology Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran, Rz_63@yahoo.com

²Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz

Abstract

The mineralization index of Yeylaghe Gharachi, as part of Arasbaran metallogenic belt, is located ~25 km northwest of Ahar, East-Azarbaidjan Province, NW Iran. The host rocks of this index consist of composite intrusive rocks with lithologic compositions of granite, quartz monzonite, granodiorite and diorite of Oligocene and Oligo-Miocene age. The alteration zones in this area are mainly potassic, phyllic, argillic, propylitic, silicic and carbonate. Pyrite is the major hypogene sulfide mineral accompanied by magnetite, chalcopyrite, molybdenite, sphalerite and galena. The main supergene minerals in this area include hematite, goethite, limonite, bornite, chalcocite, covellite and malachite that accompany the hypogene mineral assemblage. In investigation the phase contents of fluid, five types of fluid inclusions have been recognized: mono-phase liquid (L), mono-phase vapor (V), liquid-rich two-phase (L+V), vapor-rich two-phase (V+L), and multiphase (L+V+S). Homogenization temperatures of the studied fluid inclusions vary from 190 to 530 °C. Considering the last ice-melting temperature of aqueous two-phase inclusions and halite melting temperature in the aqueous multiphase inclusions, the salinity range is between 0.4 to 59 wt.% NaCl equivalent. Based on the microthermometric results of fluid inclusions, it can be conceived that episodic boiling and dilution by underground water of meteoric origin were the main mechanisms in development and evolution of this index. The zonation pattern of the alteration, mineralization and fluid inclusion data indicate that the Yeylaghe Gharachi mineral index is the most similar to porphyry copper deposits and the associated metallic veins.

Keywords: Mineralization, Alteration, Fluid inclusions, Yeylaghe Gharachi, Ahar.

۱- مقدمه

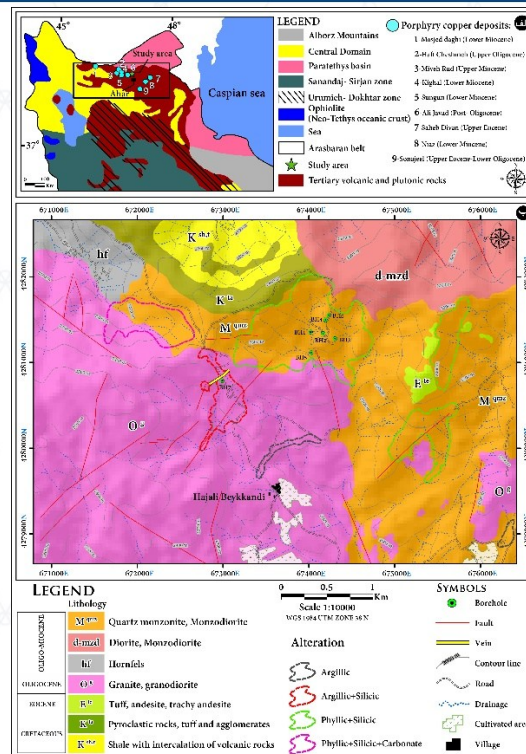
نشانه معدنی ییلاق قره‌چی به عنوان بخشی از کمربند مس پورفیری ارسباران با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 0' 7''$ طول خاوری و $38^{\circ} 39' 48''$ عرض شمالی در ۲۵ کیلومتری شمال باختر شهرستان اهر و ۹ کیلومتری خاور کانسار مس- طلا پورفیری علی‌جواد واقع شده است. بررسی‌های انجام شده بر روی این نشانه و مناطق پیرامون آن تنها شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان و کلیبر، حفر ترانشه و حفاری ۷ گمانه اکتشافی به روش مغزه‌گیری با مجموع مترای ۱۸۱۸ متر به عمق حد بیشینه ۴۶۱ متر توسط شرکت مهر اصل می‌باشد و اطلاعات جامع و دقیقی درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری آن وجود ندارد. در پژوهش حاضر میانبارهای سیال موجود در رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی همراه با دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و آرژیلیک مورد بررسی قرار گرفتند و بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی آن‌ها، شرایط دما، فشار و ترکیب شیمیایی سیال ماگمایی- گرمابی مسئول کانه‌زایی و دگرسانی در طول عمر سیستم گرمابی بازسازی شد. در نهایت با استفاده از تلفیق نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال و بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری، شرایط فیزیکو- شیمیایی، خاستگاه و روند تکامل سیالات گرمابی مسئول کانه‌زایی فلزات پایه مشخص شد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه میانبارهای سیال، تعداد ۲۰ عدد نمونه از رگه- رگچه‌های سطحی و عمقی کوارتز- سولفیدی پرکننده شکستگی‌ها و فضاهای خالی توده‌های نفوذی گرانودیوریتی، کوارتز مونزونیتی و دیوریتی دگرسان شده که کانی کوارتز مهم‌ترین همبرزاد با کانه‌زایی است، انتخاب گردید و مقطع دوبر صیقل آن‌ها با ضخامت حدودی ۱۰۰ میکرون تهیه شد. سپس با انجام بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری، تعداد ۱۰ مقطع جهت مطالعه ریزدماسنجی در آزمایشگاه دانشگاه پیام نور واحد تبریز انتخاب شدند. در این آزمایشگاه پارامترهای دمایی به کمک استیج مدل THMS600 گرم کننده و منجمد کننده لینکام که بر روی میکروسکوپ الپیوس BX60 نصب شده، مطالعه شدند. جهت تنظیم دستگاه از استانداردهای نیترا سدیم با نقطه ذوب 308°C و تتراکلریدکربن با نقطه ذوب $22/99^{\circ}\text{C}$ استفاده شد.

۳- بحث

کمربند مس پورفیری ارسباران در شمال باختری ایران و بخش‌های مرکزی کمربند کوهزایی و فلزایی آلپ- هیمالیا واقع شده است (شکل ۱ الف و ب). این کمربند با عرض تقریبی ۸۰ کیلومتر و طولی بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر، از سنگ‌های رسوبی- آتشفشانی کرتاسه و توده‌های نفوذی سنوزوئیک تشکیل شده است. نفوذ طیف گسترده‌ای از توده‌های نفوذی با ماهیت و سن‌های متفاوت در طول ائوسن- میوسن (Simmonds et al., 2017; Castro et al., 2013) منجر به تشکیل دگرسانی‌های وسیع با کانه‌زایی مختلف از قبیل کانسارهای پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در طول این کمربند شده است (آقازاده، ۱۳۸۸). در کمربند ارسباران فعالیت‌های ماگمایی با توده‌های نفوذی کالک- آلکالن به سن ائوسن پایانی آغاز شده (Hassanpour and Sohrabi., 2018) و با توده‌های نفوذی شوشونیتی به سن اولیگوسن پایانی- میوسن زیرین ادامه می‌یابد (Aghazadeh et al., 2011; Castro et al., 2013). میوسن پایانی در این کمربند با گنبدی‌های آداکیتی مشخص می‌شود (Aghazadeh et al., 2011). کانه‌زایی مس پورفیری در این کمربند اساساً با توده‌های نفوذی ائوسن میانی- میوسن زیرین همراه است و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کانسارهای مس پورفیری سونگون، هفت چشمه، مسجد داغی، سوناجیل، صاحب‌دیوان، کیقال، نیاز و علی‌جواد اشاره کرد (شکل ۱ الف).



شکل ۱ الف) نقشه پهنه‌های ساختاری شمال باختر ایران (نبوی، ۱۳۵۵؛ Stocklin., 1968) و جایگاه کمربند مس پورفیری ارسباران بر آن (Aghazadeh et al., 2015، ب) نقشه زمین شناسی تهیه شده با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ برای منطقه ییلاق قره‌چی به همراه پروتزد پهنه‌های دگرسانی.

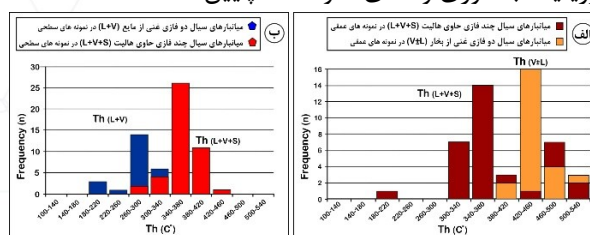
۳-۱ سنگ‌نگاری میانبارهای سیال

با توجه به حضور کانی کوارتز در انواع رگه- رگچه‌های حاوی کانه‌زایی سولفیدی فلزات پایه در پهنه دگرسانی‌های پتاسیک، فیلک و آرژیلیک منطقه ییلاق قره‌چی، نمونه‌های سطحی و عمقی از رگه-رگچه‌های سیلیسی با ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۵۰ سانتی‌متر، جهت مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شدند و مشخصات سنگ‌نگاشتی میانبارهای سیال درون آن‌ها از قبیل شکل و اندازه، رده‌بندی زایشی (اولیه، ثانویه و شبه ثانویه)، نسبت حجمی سیال به بخار، شناسایی نوع کانی‌های نوزاد با توجه به شکل بلوری و با در نظر گرفتن دمای همگن شدن و حضور پدیده‌های تغییر ثانویه میانبارهای سیال بعد از به دام افتادن مانند نش و باریک شدگی مورد بررسی قرار گرفتند. در بررسی محتویات درونی میانبارهای سیال، پنج نوع شامل تک فاز مایع (L)، تک فاز بخار (V)، دو فاز غنی از مایع (L+V)، دو فاز غنی از بخار (V+L)، و میانبار سیال چند فاز (S+L+V) شناسایی شدند.

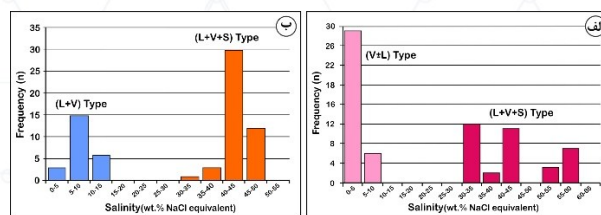
۳-۲ دمای همگن شدن و شوری نسبی

دمای همگن شدن میانبارهای سیال دو فاز غنی از بخار (V±L)، بین ۳۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده و با شوری ۰/۴ تا ۸/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام، اغلب به حالت بخار همگن شدند (شکل‌های ۲ الف و ۳ الف). در گروه میانبارهای سیال چند فاز (L+V+S)، دمای همگن شدن میانبارها از ۲۱۵ تا ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است (شکل ۲ الف). محدوده شوری آن‌ها بین ۳۱/۸ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد (شکل ۳ الف) که با میزان شوری میانبارهای سیال کانسارهای پورفیری قابل قیاس است (Morales et al., 2002). در میانبارهای سیال چند فاز، فازهای نوزاد اصلی هالیت و سیلیت بوده که گاهی اوقات با مقادیر جزئی انیدریت، هماتیت و یک فاز کدر همراه می‌باشند. در نمونه‌های سطحی، میانبارهای سیال بیشتر از نوع دو فاز غنی از مایع (L+V) و چند فاز حاوی هالیت (L+V+H) بوده و برای آن‌ها دو گستره دمایی متفاوت قابل تشخیص است (شکل ۲ ب). گستره اول مربوط به میانبارهای سیال دو فاز غنی از مایع بوده که محدوده دمایی همگن شدن آن‌ها بین ۱۹۰ تا ۳۳۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در طول سرمایش محدوده دمای ذوب نهایی آخرین بلور یخ برای این میانبارها

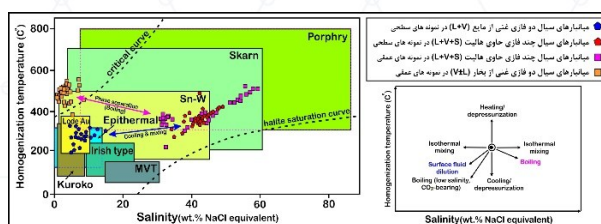
۳- تا ۱۱- سانتی گراد بدست آمده است که با استفاده از آن میزان شوری میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع ۴/۹۴ تا ۱۴/۹۸ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد (شکل ۳ ب). در گستره دمایی دوم، مجموعه میانبارهای سیال حاوی فاز نوزاد هالیت قرار می‌گیرند که دمای همگن شدن آن‌ها از ۲۷۱ تا ۴۶۰ درجه سانتی گراد متغیر است (شکل ۲ ب). به منظور تعیین تیپ نشانه معدنی ییلاق قره‌چی از نمودار دوتایی شوری در برابر دمای همگن شدن میانبارهای سیال (Wilkinson., 2001) استفاده شد (شکل ۴). تجزیه و تحلیل یافته‌ها نشان دهنده دو گروه جداگانه قابل تشخیص است که گروه اول، معرف سیالی با شوری بالا و دمای متوسط تا بالا است که این ویژگی در سیالات ماگمایی مسئول دگرسانی پتاسیک و فلیک کانسارهای پورفیری دیده می‌شود (Richards., 2011; Kouszmanov and Pokrovski., 2011; Wilkinson., 2001). گروه دوم، معرف سیالات جوی تشکیل دهنده کانسارهای اپی‌ترمال و رگه‌های پیرامونی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری در دگرسانی آرژلیک درونزاد و مرز انتقالی دگرسانی فلیک به آرژلیک با شوری و دمای متوسط تا پایین است.



شکل ۲ الف) توزیع فراوانی دمای همگن شدن میانبارهای سیال مورد بررسی در نمونه‌های عمقی، و ب) سطحی به تفکیک نوع میانبار سیال.



شکل ۳ الف) توزیع فراوانی شوری میانبارهای سیال مورد بررسی در نمونه‌های عمقی، و ب) سطحی به تفکیک نوع میانبار سیال.

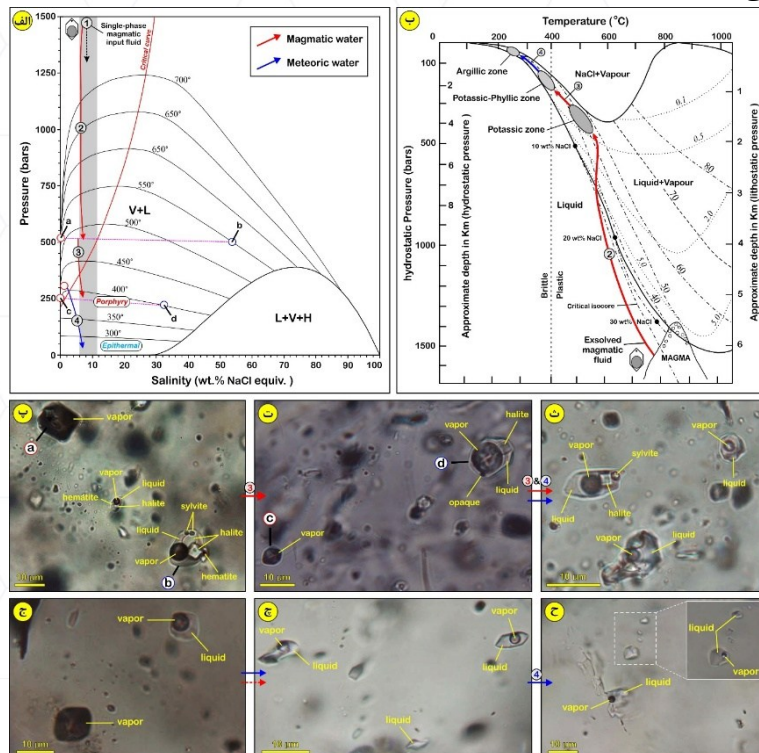


شکل ۴ الگوی توزیع و جایگاه میانبارهای سیال مورد بررسی در نمودار دو متغیره دمای همگن شدن در برابر شوری، همراه با مسیرهای نظری تغییرات شوری و دمای همگن شدن برای تعیین سازوکار تشکیل ذخایر مختلف فلزی (Wilkinson., 2001).

۳-۴ تکامل سیال گرمابی در کانه‌زایی بر اساس شواهد میانبارهای سیال

میانبارهای سیال موجود در رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرتبط با دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و آرژلیک، تکامل سیالات گرمابی در منطقه ییلاق قره‌چی را ثبت نموده‌اند، که به طور شماتیک مسیر تکامل احتمالی آن در شکل (۵ الف تا ج) ارائه شده است. در این اندیس سیال ماگمایی تک فاز صعودی در دمای ۵۳۰ درجه سانتی گراد با اولین رخداد جوشش به دو فاز غنی از بخار با شوری پایین و محلول غنی از نمک با شوری ۵۹ درصد وزنی معادل نمک طعام تفکیک شده است. فاز مایع از کلریدهای سدیم و پتاسیم غنی شده و باعث شوری ۵۹ درصد وزنی معادل نمک طعام شده است، در حالیکه فاز بخار با چگالی و شوری پایین شامل ترکیبات فرار اسیدی از جمله CO_2 ، SO_2 ، H_2S و HCl می‌باشد. فازهای سیال دارای شوری زیاد و غنی از بخار در میانبارهای سیال $\text{L-V-H}\pm\text{S}$ و $\text{V}\pm\text{L}\pm\text{H}$ به دام افتاده و با کاهش حلالیت فلزات و مواد محلول، کانه‌زایی پراکنده و رگچه‌ای کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت به صورت ناپیوسته با مرز نامنظم در بخش‌های میانی دگرسانی پتاسیک در

شرایط فشار لیتواستاتیک ۵۰۰ بار و عمق حدودی ۲ کیلومتر تشکیل داده‌اند. اولین جوشش در شرایط فشار لیتواستاتیک دگرسانی پتاسیک، باعث ناپایداری کمپلس کلریدی و ته‌نشینی سولفیدهای آهن و مس به صورت پراکنده و رگچه‌ای شده است. با کاهش تدریجی شوری و دمای سیال به زیر ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار از لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک تغییر یافته و باعث تغییر رفتار سیستم از خمیری به شکننده می‌شود. با این تغییر رفتار، فشار به طور ناگهانی کاهش یافته و با دومین رخداد جوشش و اختلاط اندک با آب‌های زیرزمینی با منشأ جوی در بازه دمایی بین ۴۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، مرحله اصلی کانه‌زایی پورفیری با ته‌نشست پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت و اسفالریت با بافت رگه- رگچه‌ای متقاطع و پراکنده در مرز انتقالی دگرسانی پتاسیک به فیلیک و دگرسانی فیلیک با فشار هیدرواستاتیک ۱۲۵ تا ۲۵۰ بار و عمق معادل ۱/۲۵ تا ۲/۵ کیلومتر اتفاق افتاده است. دگرسانی آرژلیک درون‌زاد نیز در بازه دمایی ۱۹۰ تا ۳۳۷ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل نمک طعام در فشار هیدرواستاتیک ۱۰۰ بار و عمق حدودی ۱ کیلومتری تشکیل شده است. چگالی سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی آرژلیک کمتر از ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده که در مقایسه با مقادیر بالاتر از ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای دگرسانی‌های پتاسیک و فیلیک، نشان دهنده اختلاط آن‌ها با آب‌های جوی و رقیق شدن سیالات مسئول این دگرسانی می‌باشد.



شکل ۵ الف) نمودار فشار- شوری، ب) نمودار فشار- دما- عمق در سیستم $H_2O-NaCl$ بر گرفته از مرجع (Sourirajan and Kennedy, 1962; Fournier, 1999; Wilkinson, 2001)، نمایش مسیر صعود سیالات ماگمایی- گرمابی (خطوط قرمز رنگ) و اختلاط آن با آب‌های جوی (خطوط آبی رنگ) در اندیس معدنی بیلاق قره‌چی به همراه انواع دگرسانی‌های ایجاد شده و پ تا ح) میانبارهای سیال به دام افتاده در طول مسیر تکامل.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و ریز دماسنجی میانبارهای سیال موجود در رگه-رگچه‌های کوارتز- سولفیدی، تکامل گرمابی و شرایط فیزیکو-شیمیایی سیالات ماگمایی- گرمابی مسئول کانه‌زایی در نشانه معدنی بیلاق قره‌چی بازسازی شد. منطقه‌بندی دگرسانی، کانه‌زایی و میانبارهای سیال در گستره مورد مطالعه به صورت همراهی میانبارهای سیال غنی از فاز بخار با میانبارهای چند فازی با شوری بین ۳۱/۸ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام در رگه- رگچه‌های

کوارتز- سولفیدی حاوی کانه‌زایی مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت و اسفالریت در دگرسانی پتاسیک و بازنهشت آن با دگرسانی فیلیک، همراهی میانبارهای دو فاری غنی از مایع با میانبارهای غنی از فاز بخار و چند فازی حاوی هالیت با شوری ۳۴/۱۷ تا ۴۸/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام در دگرسانی فیلیک انتقالی با کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کوارتز، کلسیت، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و در نهایت، فراوانی میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع با شوری ۴/۹۴ تا ۱۴/۹۸ درصد وزنی معادل نمک طعام در رگه- رگچه‌ای کوارتز- سولفیدی موجود در دگرسانی آرژیلیک درونزاد، نشان دهنده این است که نشانه معدنی ییلاق‌قره‌چی دارای بیشترین شباهت با ذخایر مس پورفیری و رگه‌های چند فلزی پیرامون مرتبط با آن می‌باشد.

۵- مراجع

آقازاده م.، ۱۳۸۸. پترولوژی و ژئوشیمی گرانیتوئیدهای انزان، خان‌کندی و شیور داغ (شمال و شرق اهر، آذربایجان شرقی) با نگرشی بر کانی‌زایی وابسته، پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. مقدمه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۱۱۰ صفحه.

- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z., Vogt, K., 2011, Post-Collisional Polycyclic Plutonism from the Zagros Hinterland: The Shaivar Dagh Plutonic Complex, Alborz Belt, Iran, Geological Magazine, 148, 980-1008.
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L., 2015, Temporal-Spatial Distribution and Tectonic Setting of Porphyry Copper Deposits in Iran: Constraints from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology, Ore Geology Reviews 70, 385-406.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., Chichorro, M., 2013, Late Eocene-Oligocene Post-Collisional Monzonitic Intrusions from the Alborz Magmatic Belt, NW Iran. An Example of Monzonite Magma Generation from a Metasomatized Mantle Source, Lithos 180-181, 109-127.
- Fournier, R.O., 1999, Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment, Economic Geology, 94, 1193-1211.
- Hassanpour, S., Sohrabi, Gh., 2018, Major-trace elements geochemical characterization, geochronology and radiogenic isotopes of Eocene magmatic rocks in Anique, Qaradagh pluton, NW Iran, Periodico di Mineralogia 87, 173-191.
- Kouzmanov, K., Pokrovski, G.S., 2012, Hydrothermal Controls on Metal Distribution in Porphyry Cu (-Mo-Au) Systems, Society of Economic Geologists, Special Publication 16, 573-618.
- Morales, S.R., Both R.A., Golding S.D., 2002, A fluid inclusion and stable isotope study of the Moonta copper-gold deposits, South Australia: evidence for fluid immiscibility in a magmatic hydrothermal system, Geology 192, 211-226.
- Richards, J.P., 2011, Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins, Ore Geology Reviews 40, 1-26.
- Simmonds, V., Moazzen, M. Mathur, R., 2017, Constraining the timing of porphyry mineralization in northwest Iran in relation to Lesser Caucasus and Central Iran; Re-Os age data for Sungun porphyry Cu-Mo deposit, International Geology Review, 59, 1561-1574.
- Sourirajan, S., and Kennedy, G.C., 1962, The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures, American Journal of Science, 260, 115-141.
- Stocklin J., 1968, Structural history and tectonics of Iran; a review, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52, 1229-1258.
- Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, Lithos 55, 229-272.