

Research Article

Geochemistry of trace and rare earth elements of the productive intrusions in the Kuh-Kapout porphyry copper deposit, Urumieh–Dokhtar magmatic arc

Alireza Zarasvandi ¹ , Nasim Haghighat Jou ², Nader Taghi Pour ³ 
Mohsen Rezaei ⁴, Mohammad Amiri Hoseini ⁵, Ghazal Zarasvandi ⁶

¹ Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, zarasvandi_a@scu.ac.ir

² Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, nhjgeo@gmail.com

³ Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran, taghipour@du.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, m.rezaei@scu.ac.ir

⁵ Head of Mining and Geological Research, Management of Research and Technology of Golgohar Mining and Industrial Company, Kerman, Iran, amiri_moh@golgohar.com

⁶ B.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran,

ARTICLE INFO

Received: 12 May 2024

Accepted: 17 July 2024

Keywords

Kuhkapout Porphyry Copper Deposit
Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc
Geochemistry
Rare Earth Elements
Trace Elements



10.22108/ijp.2024.141370.1332

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Cenozoic Urumieh-Dokhtar magmatic arc has characteristics similar to those of Andean-type magmatic arcs. Various types of magmatism occurred in this arc including calc-alkaline and K-rich calc-alkaline magmatism and less of them alkaline magmatism (Shahabpour, 1982). Kerman porphyry copper belt (KPCB) in the southern part of this arc includes two types of granitoids: (1) Jebal Barez-type (late Eocene–early Miocene) associated with minor Cu-mineralization, and (2) Kuh Panj-type (middle Miocene–Pliocene), which is associated with major porphyry copper deposits (Mirzababaei et al., 2016). Kuh-kapout porphyry deposit (Eocene) in the southern part of KPCB is affected by Jebal Barez type granitoids. This deposit has been studied to determine the genesis of magmatism, mineralization and tectonic setting, by the whole rock geochemistry of quartz diorite intrusions, this evaluation is based on trace and REEs geochemistry data.

Regional Geology

This area is located in the southern part of the Urumieh–Dokhtar magmatic belt and in the Kerman porphyry copper belt. Arc-related magmatism events in this region include Paleocene to Oligocene magmatism

and including andesite- dacite volcanic-sedimentary rocks with porphyry texture and quartz diorite intrusions with porphyry texture. In these rocks on the surface, there are intermediate argillic alteration events, and with increasing depth, quartz-sericite-pyrite zone and then potassic and alkali (potassium)-feldspar-sericite-chlorite-

 Corresponding Author

To cite this article: Zarasvandi, A.R., Haghighat Jou, N., Taghi Pour, N., Rezaei, M., Amiri Hoseini, M., and Zarasvandi, G. (2024) Geochemistry of trace and rare earth elements of the productive intrusions in the Kuh-Kapout porphyry copper deposit, Urumieh–Dokhtar magmatic arc. *Petrological Journal*, 15(2), 21-54.

anhydrite zone are observed. Quartz diorite rocks include plagioclase and hornblende crystals (about 30 to 40 percent), biotite (10 to 15 percent), and potassium feldspar and quartz. Potassic alteration zone in depth is recognized by hydrothermal biotite, K-feldspar, magnetite and anhydrite. Mineralization in quartz diorite intrusions is more in the form of pyrite, chalcopyrite, and magnetite in association with the potassic alteration zone. Andesite-dacite volcanic-sedimentary rocks and quartz diorite rocks intruded by post-mineralized and barren micro diorite intrusion.

Analytical method

The samples were selected based on field observations and changes in mineralization-alteration rates from the weak alteration section of the quartz-sericite zone. For analyzing trace and rare earth elements, Samples were analyzed by the multi-acid method and used the Microwave Digest. Many of handpick and drill core samples were prepared to form thin sections for microscopic studies

Alteration and mineralization

In this area, different types of hydrothermal alteration events including potassic, phyllic, propylitic, argillic and K-feldspar-chlorite-sericite, occurred that was influenced by fractures and faults. Quartz diorite intrusive rocks shows intense potassic and phyllic alteration zone, the main type of hydrothermal alteration zone is potassic and contains quartz \pm chalcopyrite \pm pyrite \pm magnetite as mineralized veins and scattered event of pyrite, chalcopyrite, and magnetite. The phyllic alteration zone includes pyrite, which increases with depth. In the quartz-sericite-pyrite alteration zone, abundant chlorite and plagioclase are observed in the groundmass along with the occurrence of pyrite and anhydrite, and Cu mineralization in the form of scattered chalcopyrite.

Whole rock chemistry

In this study, it seems that due to the presence of phases such as garnet and hornblende in the magma in the origin, a fractionation between HFSEs and LILEs has occurred (Green, 2006). Remaining of HFSEs and HREEs in the origin lead to low amounts of these elements in the resulting magma. The occurrence of negative anomalies in these elements, on the other hand, can be due to crustal contamination with mantle magmatism during their ascent to the surface. Anomaly in trace elements and ratios of REEs and trace elements, emphasizes that magmatism originated from the volcanic arc and subsequent events, according to the Th/Nb-Ba/Th diagrams and the La/Sm-Sm/Yb diagram, including the presence of lower crustal contamination and the significant role of fluid in the production of metasomatized magmatism. According to the studies on

data normalized to the primary mantle, a depletion in Ba and Nb values and an enrichment in Rb and Cs have occurred.

Discussion

Studying trace and rare earth elements in porphyry copper deposits is useful for determining the mineralization and fertility of magmatism, tectonomagmatism-setting, crustal contamination, and mantle metasomatism. Th-Co diagram (Hastie et al., 2007) and Th/Yb-Ta/Yb diagram (Hastie et al., 2007) indicate that most of the samples in this study area were plotted in the calc-alkaline magma region of the diagrams. Using the Sm/Yb versus La/Sm diagram (Aldanmaz et al., 2000) in the quartz diorite rocks shows a magmatism with higher Sm/Yb ratios than what is usually found for the spinel lherzolite. The plotting of the samples on diagrams indicates that the samples are located near the spinel + garnet lherzolite trend, indicating that the early magmatism originated from the spinel + garnet lherzolite mantle. High values of Ba/Th compared to low values of Th/Nb emphasize the contamination of subducting material or lower crust with magma; the (Dy/Yb)_{CN}-Sr/Nd (Kelemen et al., 2003) diagram indicated that the process of fractional crystallization of plagioclase was effective in the evolution of magma; and finally, the study of samples in this deposit shows the relatively high water content in the magmatism, associated with the presence of garnet in the source and magma contaminated with the lower crust (Temel et al., 1998). In order to investigate the tectonic environment of the deposit, the diagrams of Pearce et al. (1984) were used. The samples are located in the active continental margin and associated with collision magmatism.

Conclusions

analysis of the trace and REEs of the quartz diorite rocks in the region, a magmatism related to the arc with the calc-alkaline series can be recognized. In terms of the evolution of magmatism, according to the interpretation of trace element data, from the origin to the surface, it can be considered a magmatism that originated from the partial melting of magma with the metasomatized spinel + garnet lherzolite composition in the source with the presence of garnet and amphibole phases. In terms of geochemical properties magmatism is more similar to Kuh-Panj type granitoid than the Jabal Barez type; and it is placed in the category of semi-economic to economic magmatism. Based on studies of trace elements from whole rock data, the tectonomagmatism of the rocks in the region is in the range of the active continental margin to collision setting.

زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در توده‌های مولد کانسار مس پورفیری کوه‌کیوت، کمان ماگمایی ارومیه-دختر

علیرضا زراسوندی^۱ ، نسیم حقیقت‌جو^۲، نادر تقی‌پور^۳ 

محسن رضایی^۴، محمد امیری حسینی^۵، غزال زراسوندی^۶

^۱ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، zarasvandi_a@scu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، nhjgeo@gmail.com

^۳ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، taghipour@du.ac.ir

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، m.rezaei@scu.ac.ir

^۵ رئیس تحقیقات معدن و زمین‌شناسی مدیریت تحقیقات و فناوری شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، کرمان، ایران، amiri_moh@golgohar.com

^۶ دانشجوی کارشناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

کانسار مس پورفیری کوه‌کیوت در بخش جنوب‌خاوری پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و در کمربند مس کرمان در جبال بارز جای دارد. مطالعه واحدهای سنگی منطقه شامل واحدهای سنگی آتشفشانی آندزیت-داسیتی بافت پورفیری به سن ائوسن دارد که با توده آذرین درونی کوارتزدیوریت و توده آذرین درونی دایک میکرودیوریت قطع شده‌اند. بررسی‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی نشان‌دهنده رخداد گسترده کانه‌زایی سولفید مس در توده آذرین درونی کوارتزدیوریتی به‌ویژه پهنه دگرسانی پتاسیک به‌صورت پیریت و کالکوپیریت است. کانه‌زایی بیشتر به‌صورت رگه‌های کوارتز \pm پیریت \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت است. برپایه داده‌های شیمیایی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در نمودار Th/Yb-Ta/Yb، توده آذرین درونی کوارتزدیوریتی پیامد ماگماتیسم مرتبط با کمان و سری کالک‌آلکان است. نبود آنومالی منفی شدید Eu و Sr از ویژگی‌های یک ماگماتیسم اکسیدان و غنی از سیال در این منطقه است. غنی‌شدگی نسبی LILEs و LREEs نسبت به HFSEs و HREEs در کوارتزدیوریت گویای شرایط گوشته دگرنهاد آبدار با حضور فازهای گارنت و آمفیبول در خاستگاه است. بررسی‌ها نشان‌دهنده رخداد یک ماگماتیسم خاستگاه یافته از گوشته اسپینل + گارنت لرزولیت با رخداد ذوب‌بخشی پس از آن و سپس تبلور پلاژیوکلاز در ژرفای کم است. شواهد زمین‌شیمیایی مانند مقدار بالای Ba/Th در برابر مقدار کم Th/Nb در توده آذرین درونی کوارتزدیوریتی بر رخداد آلودگی مواد تیغه فرورونده و یا پوسته زیرین با ماگما تاکید میکند. رخدادهای تکتونوماگماتیسم منطقه شواهدی از ماگماتیسم وابسته به کمان تا همزمان با برخورد را نشان دادند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۲/۲۳


تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

کلید واژه‌ها

کانسار مس پورفیری کوه‌کیوت
کمان ماگمایی ارومیه-دختر
زمین‌شیمی
عنصرهای کمیاب
عنصرهای خاکی کمیاب



doi: 10.22108/ijp.2024.141370.1332

 نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: زراسوندی، ع.ر.، حقیقت‌جو، ن.، تقی‌پور، ن.، رضایی، م.، امیری حسینی، م.، زراسوندی، غ. (۱۴۰۳) زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در توده‌های مولد کانسار مس پورفیری کوه‌کیوت، کمان ماگمایی ارومیه-دختر. پتروولوژی، ۱۵ (۲)، ۲۱-۵۴.

مقدمه

(KCMA) در بخش جنوب‌خاوری کمربند ماگمایی ارومیه - دختر که میزبان بسیاری از ذخایر مس پورفیری در ایران است، با گسترش توده‌های آذرین درونی کالک‌آلکالن به سن ائوسن - الیگوسن و میوسن با کانه‌سازی مس، مولیبدن و طلا به‌ویژه پورفیری همراه بوده است و به‌عنوان یک کمربند مهم کانه‌زایی مس پورفیری، شامل دو نوع از گرانیوتوییدهای نابارور نوع جبال بارز به سن ائوسن پایانی و میوسن آغازین و گرانیوتوییدهای نوع کوه‌پنج و بارور به سن میوسن میانی و پالئوسن است (Mirzababaei et al., 2016) بخش شمال‌باختری کمربند مس کرمان (با نام دهج - ساردوییه) دارای ذخایر مس پورفیری بارور است (Dimitrijevic, 1973). این بخش با ماگماتیسم سنوزوییک، در ائوسن بیشتر دربردارنده فعالیت‌های آتشفشانی و در الیگوسن شامل فرایندهای ماگمایی آذرین درونی است و دربردارنده بسیاری از ذخایر مس پورفیری مانند سرچشمه، میدوک، سرکوه و آبدر است. این سامانه از مهم‌ترین سامانه‌های فلززایی است و بیشتر در ارتباط با ماگماتیسم وابسته به پهنه فرورانش و برخورد پدید آمده است (Hassanzadeh, 1993; McInnes et al., 2009; Shafiei et al., 2005). بخش جنوب‌خاوری کمربند مس کرمان تحت‌تأثیر توده‌های آذرین درونی مرتبط با پهنه جبال بارز بوده است. پهنه جبال بارز از دیدگاه کانه‌زایی مس پورفیری ضعیف است (Aghazadeh et al., 2015). عوامل بسیاری بر رخداد ماگماتیسم بارور مس پورفیری مؤثر است که در یک کمان، می‌توان بی‌آب شدن تیغه فرورونده به‌دنبال ذوب گوه‌گوشته‌ای دگرنهاد^۱ را نام برد. این فرایند پیدایش ماگمای بارور سرشار از آب، مواد فرار، عنصرهای هالوژن و غنی از فلز و سولفور را در پی دارد (John et al., 2010). افزون‌براین، پهنه‌های معدنی در بسیاری از ذخایر مس پورفیری در ژرفای ۱ تا ۶ کیلومتری پدید

رخداد برخورد میان صفحه عربستان و ایران در ائوسن پایانی - الیگوسن (Dargahi et al., 2010; Aghazadeh et al., 2011) تجمع، دگرریختی و ضخیم‌شدگی پوسته در بخش‌هایی را به‌دنبال داشته است (Aghazadeh et al., 2011) همچنین، در این مرحله فرایندهای آتشفشانی گسترده آغاز سنوزوییک در ائوسن پسین قطع شدند و توده‌های آذرین شوشونیتی و سنگ‌های آذرین درونی کالک‌آلکالن پتاسیم بالا در کمان ماگمایی ارومیه - دختر در الیگوسن جایگیری کردند (Dargahi et al., 2010; Aghazadeh et al., 2011). رخداد کمان ماگمایی ارومیه - دختر منجر به تولید ذخایر ماگمایی فراوان مانند ذخایر مس پورفیری فراوان در این کمان شده است. کانه‌زایی مرتبط با این کمان در ارتباط با گرانیوتوییدهایی است که در اثر فرورانش نئوتتیس در ائوسن تا میوسن پدید آمده‌اند (McInnes et al., 2003) از آنجایی که فعالیت ماگمایی کمان ارومیه - دختر محدود به ائوسن نمی‌شود می‌توان بسیاری از کانه‌زایی‌های مهم را در ارتباط با توده‌های آذرین درونی الیگوسن دانست، این رخدادها در ارتباط با فرایندهای فرورانشی و پیدایش کافت هستند (Ramezani et al., 2019). در ایران ذخایر مس پورفیری گسترده در پهنه ماگمایی ارومیه - دختر در ارتباط مستقیم با فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس و رخداد رژیم برخوردی در ترشیری است (Zarasvandi et al., 2015). دو بخش اصلی و مهم کانه‌زایی برای ذخایر مس پورفیری در پهنه ارومیه - دختر شامل (۱) ذخایر الیگوسن تا آغاز میوسن غیر آداکیتی هستند که بیشتر آنها در هنگام بسته‌شدن پایانی اقیانوس نئوتتیس پدید آمده‌اند، و (۲) ذخایر میوسن زیرین تا میوسن پایانی که در جایگاه پس از برخورد پدید آمده‌اند و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی شبه‌آداکیتی دارند. کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان

¹ Metasomatized mantle wedge

دختر (UDMB) تشکیل شده است. کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر بر کمر بند کوهزایی و فلز زایی آلپ- هیمالیا منطبق است و نزدیک به ۲۰۰۰ کیلومتر از شمال باختری تا جنوب‌خاوری ایران امتداد دارد و میان بلوک سنندج- سیرجان و بلوک‌های قاره‌ای په‌ننه ساختاری ایران مرکزی جای دارد (Alavi, 2007). فرورانش اقیانوس نئوتتیس در تریاس ژوراسیک پیشین (Arvin et al., 2007) و ادامه آن تا دوره پالئوژن و در پایان بسته‌شدن آن و برخورد نهایی صفحه عربستان با ایران مرکزی در کرتاسه پسین تا میوسن پیدایش و تکامل کمان ماگمایی سنوزویک ارومیه- دختر در ایران را به دنبال داشته است. این کمان ویژگی‌های کمان‌های ماگمایی نوع آند را نشان می‌دهد. بیشتر واحدهای آتشفشانی در کمان ارومیه- دختر به سن ائوسن (Verdel et al., 2011) هستند و توده‌های آذرین درونی آن سن میوسن نشان می‌دهند. فرایندهای ماگمایی گوناگون رخ داده در این کمان شامل ماگماتیسیم کالک‌آلکان و کالک‌آلکان غنی از پتاسیم و کمتر از آن ماگماتیسیم آلکان هستند (Shahabpour, 1982). بخش جنوبی این کمان شامل توده‌های آذرین درونی گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و کوآرتزدیوریت و کوآرتز مونزونیت گرانولار است (Shafiei et al., 2009). از دیدگاه سنی، توده‌های آذرین درونی جبال بارز به سن $16/9 \pm 0/2$ تا $29/7/3 \pm 7/3$ میلیون سال پیش هستند (McInnes et al., 2005). از دیدگاه جایگاه جایگیری، این منطقه در کرانه جنوب‌خاوری په‌ننه ارومیه- دختر در په‌ننه جبال بارز و در شمال شهرستان بم جای دارد. گستره مورد مطالعه در طول جغرافیایی " $58^{\circ} 07' 06''$ تا " $58^{\circ} 10' 38''$ و عرض جغرافیایی " $29^{\circ} 17' 23''$ تا " $29^{\circ} 13' 39''$ شمالی جای دارد (شکل ۱- A).

رخدادهای ماگماتیسیم مرتبط با کمان در این منطقه شامل ماگماتیسیم پالئوسن تا الیگوسن است و فرایندهای آذرین درونی و آتشفشانی کالک‌آلکان و آلکان را به دنبال داشته است. در این منطقه،

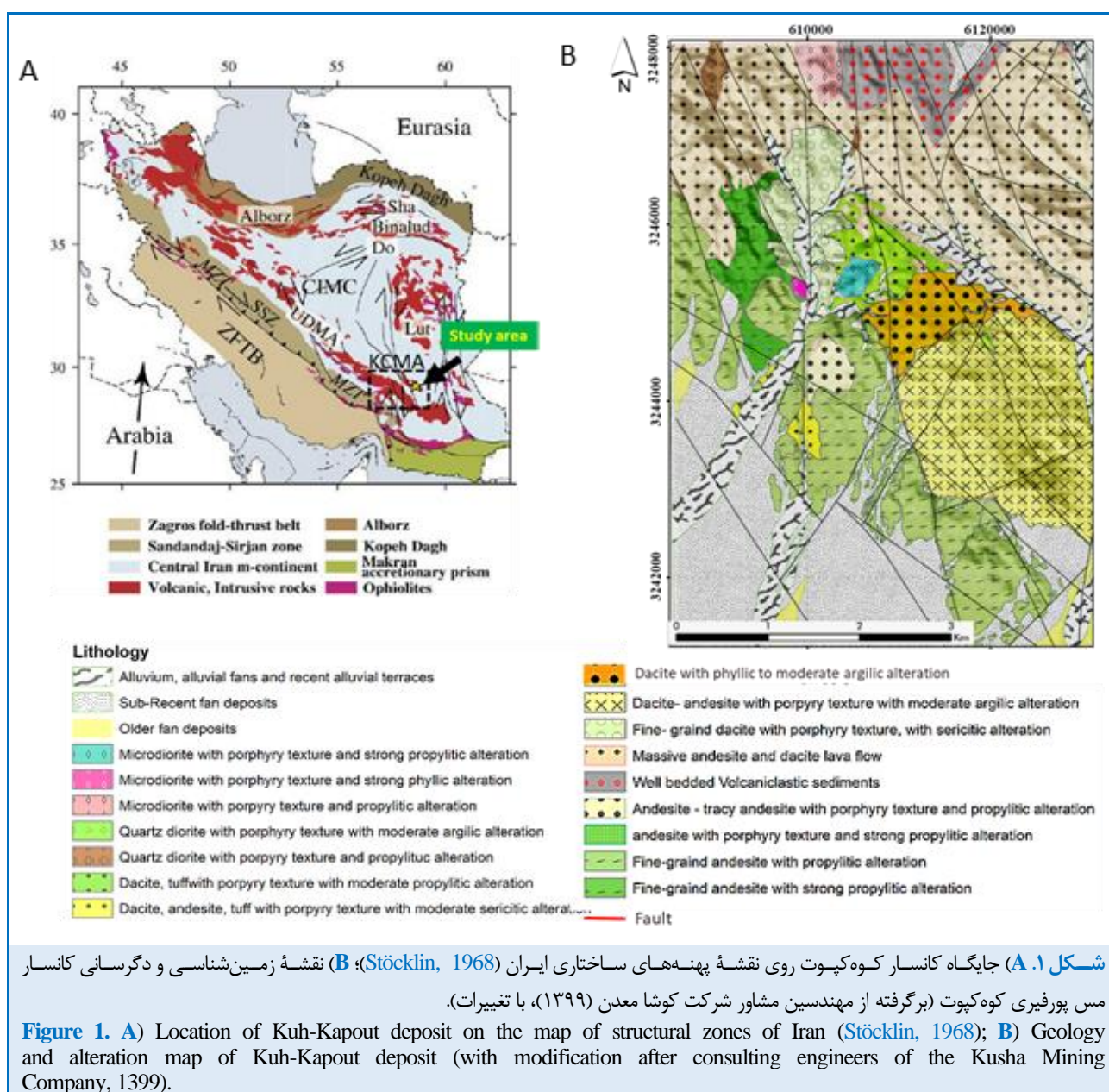
آمده‌اند (Seedorff et al., 2005) نبود همه یا برخی از این عوامل رخداد ماگماتیسیم نابارور را به دنبال دارد. با این دیدگاه، این مطالعه برای نخستین بار زایش و خاستگاه ماگما در کانسار مس پورفیری کوه‌کیوت در ناحیه جبال بارز بخشی از کمان ماگمایی سنوزویک کرمان را بررسی خواهد کرد و به تعیین فرایندهای دخیل در تکامل ماگماتیسیم و تعیین امکان کانه‌زایی مس پورفیری به عنوان یک ذخیره اقتصادی می‌پردازد. برای این کار نمونه‌هایی از توده آذرین درونی مسئول کانه‌زایی با کمترین دگرسانی برای بررسی فراوانی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب تجزیه شیمیایی شدند. این عنصرها به عنوان عنصرهای پایدار در شرایط دگرسانی شدید دیدگاه خوبی از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی ماگمای خاستگاه و روند تغییر و تکامل ماگما فراهم می‌آورند (Rollinson, 1993). بررسی‌های بسیاری پیرامون کاربرد شیمی سنگ کل و عنصرهای کمیاب برای شناخت زایش، تک‌نومماگماتیسیم و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگمای خاستگاه که مؤثر بر پیدایش کانسارهای مس پورفیری است، در ایران و جهان انجام گرفته است (مانند: Maanijou et al., 2020; Zarasvandi et al., 2022; Goudarzi et al., 2024; Hao et al., 2024) که مبنای مطالعات در این بررسی قرار گرفته‌اند.

کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر و زمین‌شناسی منطقه

کوهزایی تتیس با بیش از ۱۲۰۰۰ کیلومتر، از کوه‌های آلپ، در سراسر جنوب اروپا، ترکیه، ایران، پاکستان، تبت، هند و چین تا جنوب‌باختری اقیانوس آرام گسترش یافته است (Richards, 2015). کمر بند کوهزایی و فلز زایی زاگرس یکی از این بخش‌هاست که در قلمرو تتیس باختری جای دارد و از سه په‌ننه زمین‌ساختی اصلی به نام‌های کمر بند چین خوردگی و راندگی زاگرس (ZFTB)، منطقه سنندج- سیرجان (SSZ) و کمر بند ماگمایی ارومیه-

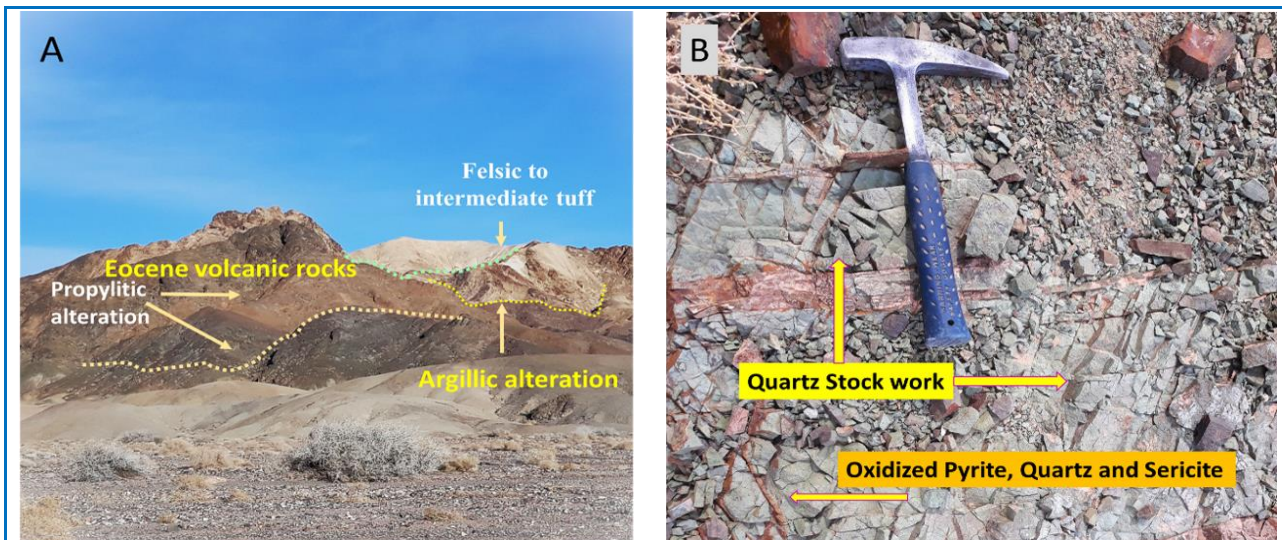
اصلی پدیدآورنده کانه‌زایی در کانسار کوه‌کپوت استوک کالک‌آلکان پورفیری کم‌ژرفا با ترکیب کوارتز دیوریتی است که در واحدهای آتشفشانی-رسوبی منطقه نفوذ کرده است و در پی آن، در حاشیه این توده‌ها رخداد دگرگونی همبری^۲ (مجاورتی) رخ داده است که دگرسانی گسترده سرسیتی، آرژیلیک و پروپیلیتیک در سنگ دیواره را به دنبال داشته است (شکل B-۱).

توالی‌های بزرگی از این آتشفشانی‌ها رخمون دارند که درصد بالایی از پوشش سطحی منطقه را دربر گرفته‌اند. واحدهای آتشفشانی و آذرآوری از مهم‌ترین فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن منطقه به‌شمار می‌روند و از گدازه‌های آندزیتی و داسیت پورفیری و ریزدانه و به مقدار کمتر از آنها، تراکی آندزیت با بافت پورفیری را شامل می‌شوند (شکل B-۱). در بخش‌هایی این واحدهای آتشفشانی با نهشته‌های توفی و مخروط افکنه و خاکستر آتشفشان پوشیده شده‌اند. فاز



می‌شود که بیشترشان دگرسانی پروپیلیتیک دارند... نقش گسل‌های منطقه و فعالیت زمین‌ساختی روی ماگماتیسم، کانه‌زایی و دگرسانی گسترده چشمگیر است، رخداد رگه‌های کوارتز سرسیتی استوک‌ورک در سطح از شمار این موارد است (شکل ۲-۲B).

رخداد دگرسانی آرژیلیک در سطح به رنگ کرمی و صورتی تا خاکستری روشن دیده می‌شوند و پهنه دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ قهوه‌ای تا خاکستری با گسترش بسیار دیده می‌شود (شکل ۲-۲A). در سطح، رخنمون‌هایی از توده‌های آذرین درونی میکرودیوریتی دایک‌مانند دیده



شکل ۲. A) نمایی کلی از دگرسانی‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک در منطقه کوه کپوت در واحدهای سنگی آواری و آذرآواری ائوسن و آندزیت‌های پورفیبری (دید رو به جنوب)؛ B) رخداد استوک‌ورک‌های پیریت-کوارتز و سرسیت در واحدهای آندزیت و داسیت‌های منطقه کوه کپوت.

Figure 2. A) A wide view of phyllic and argillic alterations in the Kuh Kaput area in Eocene clastic and pyroclastic rock units and porphyritic andesite (Southward view); **B)** Occurrence of pyrite-quartz and sericite stock works in dacite and andesite units in Kuh Kaput area.

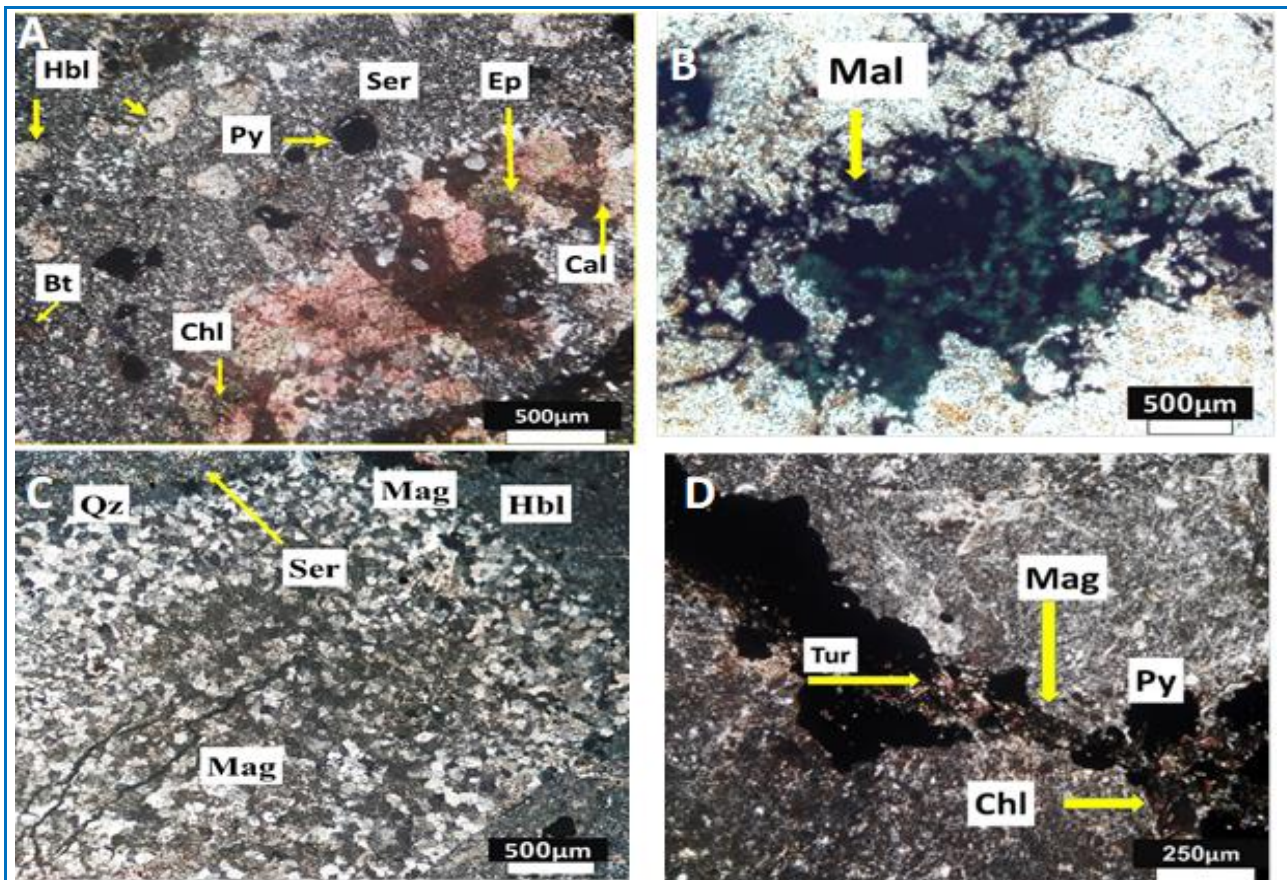
پیریت‌های ریزدانه و پراکنده دیده شد. در کانسار کوه‌کپوت بیشتر توده‌های آذرین درونی در ارتباط با جایگیری استوک پورفیبری کم ژرفا کوارتز دیوریتی هستند که توده آذرین درونی اصلی منطقه و مسئول کانه‌زایی به‌شمار می‌روند. در این منطقه توده آذرین درونی کوارتز دیوریت نشان‌دهنده بیشترین میزان اثرپذیری دگرسانی‌هاست که انواع اصلی آن را می‌توان دگرسانی پتاسیم و فلیک شمرد. در طول مغزه حفاری مورد مطالعه، آثار دگرسانی به ترتیب از سطح با رخداد‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط، پهنه کوارتز-سرسیت-پیریت (شکل‌های ۳-۳C و ۳-۳G) و سپس در ژرفای پهنه پتاسیک (شکل‌های ۳-۳H و ۳-۳K) و آلکالی (پتاسیم) فلدسپار-سرسیت-کلریت-انیدریت دیده می‌شود (شکل ۳-۳L). در ناحیه دگرسانی کوارتز-سرسیت-پیریت با ژرفای نزدیک به ۳۹۰ متر، به ترتیب در سطح کلریت، کوارتز فراوان و پلاژیوکلاز در زمینه سنگ

زمین‌شناسی و دگرسانی کانسار

بیشتر سنگ‌های آذرین و آذرآواری داسیت و آندزیت ائوسن تحت‌تأثیر رخداد‌های دگرسانی قرار گرفته‌اند. در پهنه دگرسانی پروپیلیتیک در مجاورت توده آذرین درونی کوارتز دیوریت، کانی‌های کربناته، کلریت فراوان و کانی‌های پلاژیوکلاز در واحد آتشفشانی دیده می‌شوند که به مجموعه سرسیت، اپیدوت و کلسیت تجزیه شده‌اند. کانی‌های فرومنیزین آمفیبول و بیوتیت تا اندازه‌ای به کانی‌های کلریت و کربنات دگرسان شده‌اند (شکل ۳-۳A). بیشترین رخداد‌های کانه‌زایی سوپرژن اکسیدان در این ناحیه شامل کوولیت پراکنده و ملاکیت هستند (شکل ۳-۳B). در پهنه دگرسانی آرژیلیک کانی‌های هورنبلند، کوارتز و بیوتیت ریزدانه در یک زمینه سرسیتی شده دیده می‌شوند و فاز سولفیدی به‌صورت

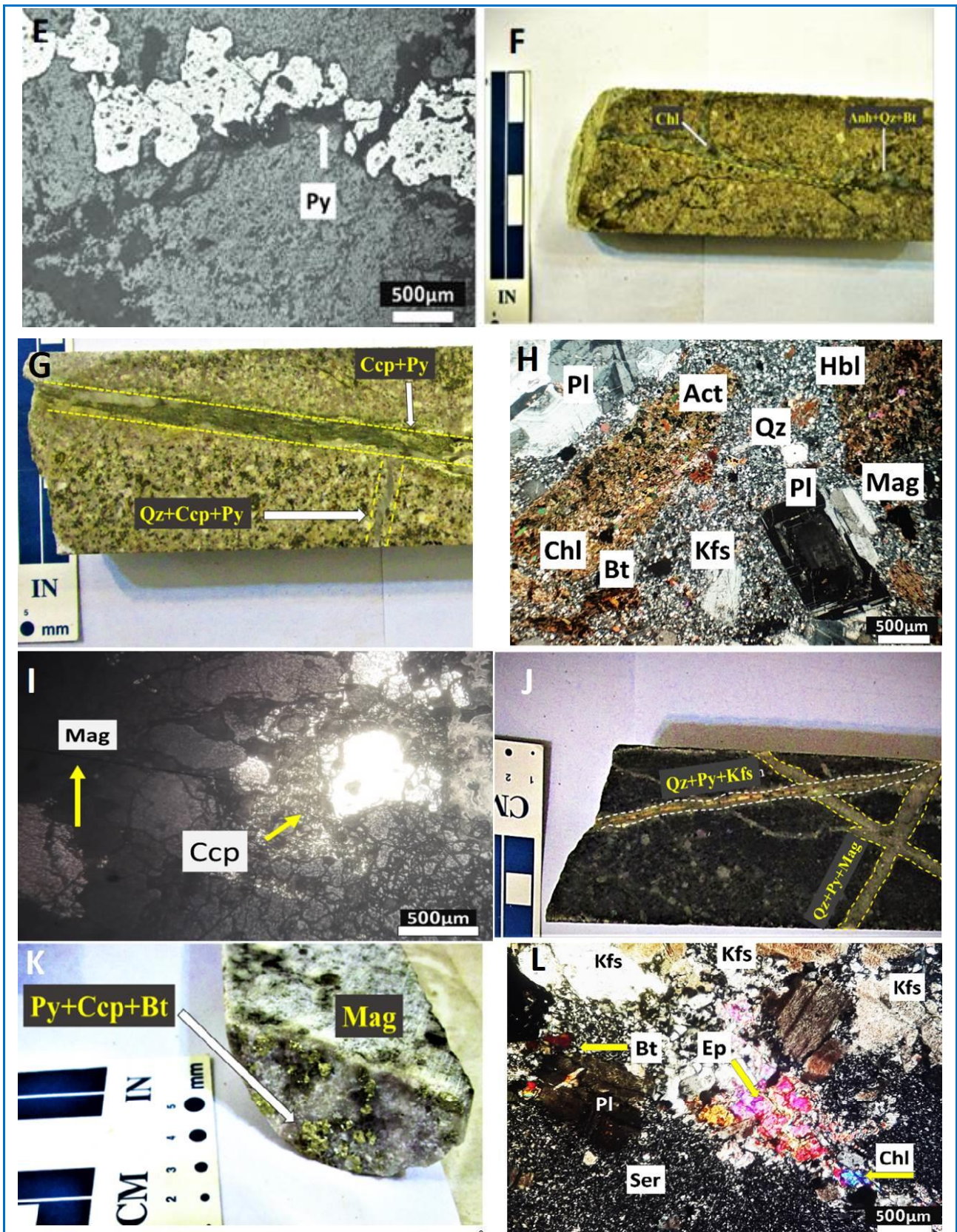
انیدریت همراه با رخداد رگچه‌های مگنتیتی و افزایش نرخ جاننشینی پتاسیم‌فلدسپار همراه است (شکل ۳-L). این پهنه به‌عنوان پهنه شاخص کانه‌زایی با رخداد بیشترین رگه‌های کانه‌زایی پیریت و کالکوپیریت در زمینه مگنتیت و بیوتیت پراکنده همراه است. بخش نهایی پهنه دگرسانی و رخدادهای کانه‌زایی، مربوط به ژرفای بیش از ۸۰۰ متری در بررسی‌های گمانه‌های حفاری است. این پهنه با نام پهنه پتاسیم‌فلدسپار-سرسیت-کلریت و انیدریت دارای کانه‌زایی محدود به‌صورت مگنتیت و پیریت ریزدانه همراه با افزایش جاننشینی آلکالی‌فلدسپار است. در این پهنه شاهد حذف بیوتیت گرمایی و افزایش جاننشینی فلدسپار پتاسیم هستیم. پلاژیوکلازها در این پهنه با کلسیت و سرسیت جانشین شده است و میزان اندکی بیوتیت ثانویه و آمفیبول دیده می‌شود. در سطح، رخداد اختلاط ماگماتیسیم در بخش‌هایی دیده می‌شود که شامل قطع توده‌های آذرین درونی کوارتز دیوریتی توسط دایک میکرودیوریتی است. توده‌های آذرین درونی دایک مانند تاخیری میکرودیوریتی (شکل ۳-M) شامل بخش‌هایی از مرکز منطقه است که واحدهای سنگی دیگر را قطع می‌کند و کله‌زایی ندارد. این واحدها بافت پورفیری تا گرانولار دارند و بیشتر آنها نسبت به دیگر توده‌های آذرین درونی، دگرسانی‌های متوسط پروپیلیتیک نشان می‌دهند (شکل ۳-N). از ویژگی‌های توده‌های آذرین درونی دایک‌مانند منطقه، وجود بافت غربالی در پلاژیوکلازهاست (شکل ۳-N). این پدیده در هنگام رخداد فرایند کاهش فشار ماگما (Nelson and Montana, 1992) یا در اثر واکنش ماگما با یک مذاب داغ‌تر و غنی از کلسیم روی می‌دهد. در فرایند کاهش فشار، وقتی ماگمای زیراشباع از H_2O با نرخ سریع صعود کند، فشار H_2O سیستم ماگمایی را افزایش و پایداری پلاژیوکلاز را کاهش می‌دهد که در نتیجه آن پلاژیوکلاز دچار انحلال خواهد شد (Nelson and Montana, 1992; Blundy and Cashman, 2001, 2005). رخداد بافت غربالی در پلاژیوکلاز در شرایطی که آثار اختلاط ماگمایی در منطقه دیده می‌شود می‌تواند در کنار دیگر شواهد یادشده نشان‌دهنده صعود سریع و هم‌دمای میکرودیوریت‌ها باشد.

به‌همراه رخداد پیریت و انیدریت و درجات متفاوتی از سرسیتی‌شدن (شکل ۳-C) به‌شکل جاننشینی بخشی تا کامل فلدسپارها دیده می‌شود، با افزایش ژرفا در این ناحیه بخش بزرگی از زمینه را سرسیت فرا گرفته است و جاننشینی فلدسپار و کانی‌های فرومنیزین با سرسیت به‌سوی ژرفای بیشتر افزایش می‌یابد. رگه‌های کانه‌زایی مگنتیت شکل‌دار و بی‌شکل همراه با کلریت و تورمالین در بخش ژرف این پهنه دیده شد (شکل ۳-D). در این پهنه کانه‌زایی سولفید مس به‌صورت رگه و پراکنده است. این پهنه شامل بخش قابل توجهی از غشاء پیریتی می‌شود، به این ترتیب که با افزایش ژرفا بر میزان رخداد رگه‌های پیریت (شکل ۳-E) افزوده شده و شاهد کاهش رخداد رگه‌های انیدریت هستیم. به‌طور کلی این پهنه را رگه‌های پیریت-کالکوپیریت و انیدریت قطع کرده‌اند (شکل‌های ۳-F و ۳-G). توده آذرین درونی کوارتز دیوریتی بافت پورفیری ریزدانه دارد که شامل بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند نزدیک به ۳۰ تا ۴۰ درصد حجمی و بیوتیت، ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی و پتاسیم‌فلدسپار و کوارتز به میزان کمتر هستند (شکل ۳-H). در ژرفا، دگرسانی پتاسیک توسط رخداد بیوتیت، مگنتیت، کوارتز و انیدریت شناخته می‌شود. در این پهنه بلورهای پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی خوب دیده می‌شوند و پلاژیوکلازها تا اندازه‌ای به سرسیت تجزیه شده‌اند و دچار رورشدی پتاسیم‌فلدسپار و بیوتیت ثانویه و نتوفرم شده‌اند. بیوتیت در این پهنه به‌صورت فنوکریست بی‌شکل تا گرد در زمینه و به‌صورت رگچه‌ای دیده می‌شود. در این پهنه، بخش‌هایی از هورنبلند و بیوتیت به‌صورت بخشی تا کامل با اکتینولیت جایگزین شده‌اند (شکل ۳-H). این پهنه به‌ویژه در ارتباط با رخداد سولفیدهای مس کانه‌زایی رگه‌ای و پراکنده است (شکل ۳-I) و تحت تأثیر محلول‌های گرمایی پدید آمده است. این پهنه شامل رخداد رگه‌های کانه‌زایی کوارتز±کالکوپیریت±پیریت±مگنتیت است که با رگه‌های کوارتز+پیریت+آلکالی‌فلدسپار قطع شده‌اند (شکل‌های ۳-J و ۳-K) و از مهم‌ترین رخدادهای کله‌زایی به‌شمار می‌روند. با افزایش ژرفا، پهنه دگرسانی شاخص پتاسیک با فراوانی بیوتیت‌های گرمایی پراکنده و جانشین فرومنیزین‌ها، رخداد



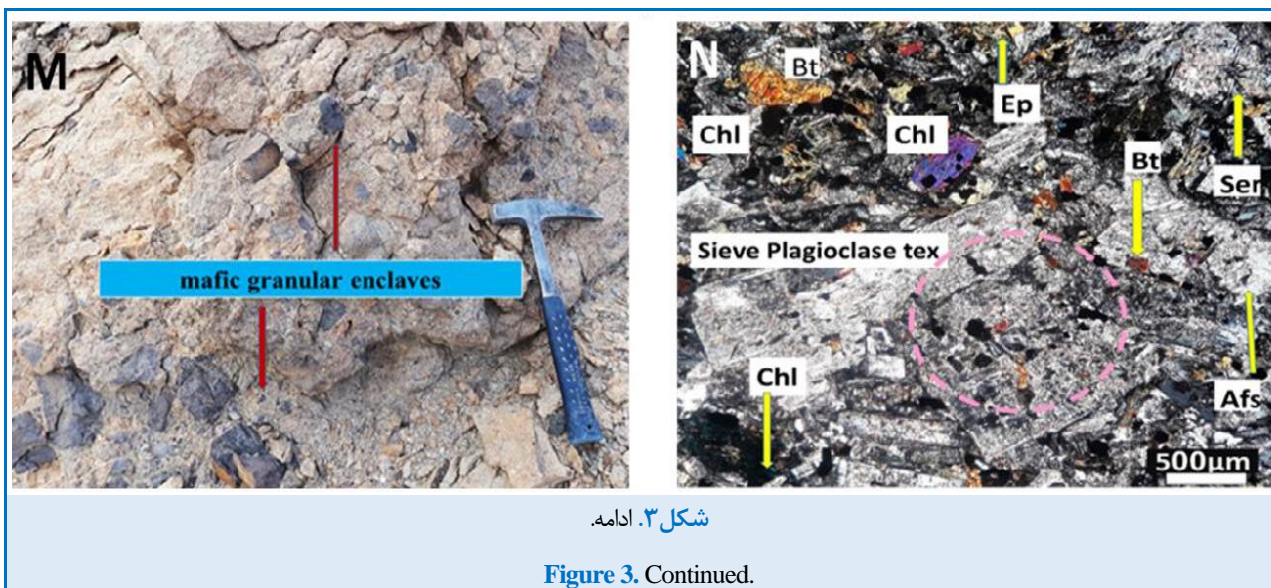
شکل ۳. A تصویر میکروسکوپی از پهنه دگرسانی پروپلیتیک و سرسیتی شدن در آندزیت‌های منطقه با بافت پورفیری؛ **B** کانه‌زایی سوپرژن مالاکیت در آندزیت؛ **C** تصویر میکروسکوپی از پهنه دگرسانی فیلیک و رخداد رگه‌های مگنتیت (نمونه NT-3-132)؛ **D** پهنه دگرسانی فیلیک و رخداد تورمالین و کلریت شعاعی (نمونه NT-3-390)؛ **E** نمونه‌ای از رگه پیریت در پهنه دگرسانی فیلیک (نمونه NT-3-248)؛ **F** رخداد رگه انیدریت و بیوتیت در پهنه دگرسانی فیلیک کم ژرفا (نمونه NT-3-195)؛ **G** رخداد رگه کالکوپیریت+پیریت+کوارتز (±مگنتیت) در پهنه دگرسانی فیلیک ژرف (نمونه NT-3-248)؛ **H** پهنه دگرسانی پتاسیک و رخداد بیوتیت اولیه و ثانویه و جانشینی کانی‌های فرومنیزین اولیه (هونبلند و بیوتیت) با بیوتیت ثانویه (نمونه NT-3-583)؛ **I** رخداد رگه کانه‌دار مس در پهنه دگرسانی پتاسیک (نمونه NT-3-593)؛ **J** نمونه مغزه حفاری با دگرسانی پتاسیک و رخداد رگه‌های کانه‌زایی اصلی؛ **K** رخداد رگه‌رگه‌های کانه‌زایی و رخداد کانه‌زایی کالکوپیریت و مگنتیت در پهنه پتاسیک؛ **L** پهنه فلدسپار-سرسیت-کلریت-انیدریت و جایگزینی پتاسیم‌فلدسپار؛ **M** رخداد انکلاو گرانولار مافیک و آثار اختلاط ماگمایی در توده آذرین درونی کوارتز دیوریتی؛ **N** تصویر میکروسکوپی از توده آذرین درونی میکرودیوریت دایک‌مانند با پلاژیوکلاز دارای بافت غربالی (نام اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans (2010)).

Figure 3. A) Microscopic image of the propylitic alteration zone and sericitization in the andesites with porphyry texture; **B**) Mineralization of malachite in the supergene zone in the andesite; **C**) Microscopic image of phyllic alteration zone and the occurrence of magnetite veins (sample NT-3-132); **D**) Phyllic alteration zone and the occurrence of tourmaline and radial chlorite (sample NT-3-390); **E**) Sample of pyrite vein in the phyllic alteration zone (sample NT-3-248); **F**) The occurrence of anhydrite and biotite veins in the shallow phyllic alteration zone (sample NT-3-195); **G**) The occurrence of chalcopyrite+pyrite+quartz (±magnetite) vein in the deep phyllic alteration zone (sample NT-3-248); **H**) Potassic alteration zone and the occurrence of primary and secondary biotite and substitution of primary ferromagnesian minerals (Hornblende and Biotite) with secondary biotite (sample NT-3-583); **I**) The Cu mineralized vein in the potassic alteration zone (sample NT-3-593); **J**) Drilling core sample with potassic alteration and the occurrence of main mineralization veins; **K**) Examples of mineralizing veins and occurrence of chalcopyrite and magnetite mineralization in the potassic zone; **L**) Feldspar – sericite - chlorite – anhydrite zone and replacement of K- feldspar; **M**) Mafic granular enclaves and magma mixing in the quartz diorite intrusive rocks; **N**) Microscopic image of dyke-like microdiorite intrusive rock with sieve plagioclase texture (Abbreviations of minerals from Whitney and Evans (2010)).



شکل ۳. ادامه.

Figure 3. Continued.



شکل ۳. ادامه.

Figure 3. Continued.

مواد و روش‌ها

مقاطع نازک صیقلی آماده‌سازی شوند. سپس به کارگاه تهیه مقطع در دانشگاه دامغان برای تهیه مقاطع نازک فرستاده شدند. بخشی از نمونه‌های گمانه‌های اکتشافی (۱۶ نمونه) برای انجام تجزیه زمین‌شیمیایی از توده آذرین درونی و تعیین فراوانی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب با هدف مطالعه شیمی توده آذرین درونی و تعیین خاستگاه زمین‌ساختی توده‌های آذرین درونی آماده شدند. تجزیه نمونه‌ها با هدف تعیین شیمی عنصرهای کمیاب با روش آنالیز چند اسیدی و به‌کارگیری Microwave Digest انجام شد. سپس محلول نهایی نمونه‌ها با دستگاه ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما تجزیه شیمیایی شد.

بحث و بررسی

رده‌بندی زمین‌شیمیایی و کانه‌زایی مس پورفیری کوه‌کپوت

ذخایر معدنی، نقاط کانونی شار عظیمی از فلزها و انرژی هستند که توسط فرایندهای زمین که در مقیاس‌های مختلف از مقیاس منطقه‌ای تا مقیاس کراتونی عمل می‌کنند پدید می‌آیند (Wyborn et al., 1994). ذخیره‌های پورفیری $Cu \pm Mo \pm Au$ به‌صورت تیپیکال از سیال‌های گرمابی خارج

در منطقه کوه کپوت گمانه‌های قطع‌کننده توده آذرین درونی نشان‌دهنده درجه بالایی از دگرسانی هستند؛ زیرا کانه‌زایی دارند و فرایندهای پس از جایگیری را نشان می‌دهند. از این‌رو، انتخاب نمونه‌های نادگرسان و دگرسانی خفیف یک چالش به‌شمار می‌رود. همه بخش‌های مغزه حفاری با دقت بررسی شد و نمونه‌ها با توجه به هرگونه پتانسیل دگرسانی گرمابی گزینش شدند. بر پایه بررسی‌های صحرائی و تغییرات نرخ کانه‌زایی-دگرسانی، نمونه‌ها از بخش دگرسانی ضعیف پهنه کوارتز-سرسیت-پیریت برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی برگزیده شدند که نشان‌دهنده بیشتر از ۱۰ درصد رخداد کانی‌های مرتبط با دگرسانی نباشند. پس از انجام بازدیدهای میدانی در منطقه، شمار ۴۰ نمونه مناسب از واحدهای آتشفشانی و دارای کانه‌زایی و دگرسانی و رخنمون‌های سطحی از توده آذرین درونی برداشت شدند. افزون بر آن، برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی، در کارگاه تهیه مقطع زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز نمونه‌هایی از مغزه‌های حفاری شده از توده آذرین درونی اصلی و دایک میکرودیوریت برش داده شدند تا برای تهیه

دگرسانی گرمایی قرار نمی‌گیرند. از این‌رو، برای تعیین میزان تغییر و تحولات ماگمای اولیه نسبت به ماگمای مولد کانه‌زایی به کار برده می‌شوند. عنصرهای Cr و Ti ، Y ، Ta ، Nb ، Hf ، Zr ، Th ، La و شاید Eu و Sc و Ga در میان کم‌تحرک‌ترین عناصر هستند. با این حال تغییر در ترکیب سیال از غنی از H_2O به سیال غنی از CO_2 یا ذوب‌بخشی غنی از SiO_2 و یا افزایش دما و یا توان بسیار بالای سیال ممکن است عنصرهای نامتحرک را به حرکت در آورد (Hill et al., 2000). در جدول ۱ فراوانی عنصرهای خاکی کمیاب و کمیاب برای گزیده‌ای از نمونه‌ها آورده شده است (داده‌های بهنجارسازی از: Boynton, 1985). شکل ۴ توزیع و فراوانی عنصرهای مس و مولیبدن در ارتباط با فراوانی روی و سرب را در طول گمانه اکتشافی حفاری شده در توده آذرین درونی اصلی نشان می‌دهد. در اینجا تغییرات نسبت $\text{Cu}+\text{Mo}/\text{Pb}+\text{Zn}$ همبستگی خوبی با تغییرات فراوانی در Cu و Mo دارد که می‌تواند نشان‌دهنده جای‌داشتن گمانه حفاری در مرکز سیستم کانه‌زایی باشد.

می‌شوند و از ماگماهای کالک‌آلکالن مرتبط با فرورانش پدید می‌آیند. طیف گسترده‌ای از جایگاه‌های زمین‌ساختی طیف گسترده‌ای از شرایط بالقوه برای پیدایش ماگما و در پی آن، طیف گسترده‌ای از ذخیره‌های معدنی گوناگون مرتبط را به دنبال دارند. گمان می‌رود منبع نهایی توده‌های آذرین درونی کم‌ژرفا مسئول کانه‌زایی پورفیری، ماگماهای مافیک کمان باشد (Hou et al., 2011). بیشتر محدوده اکتشافی کوه‌کپوت تحت‌تأثیر توده‌های آذرین درونی و آتشفشانی‌های ائوسن بوده است و در ارتباط با رخدادهای ماگمایی مرتبط با کمان پدید آمده است. نقش بررسی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در کانسارهای مس پورفیری برای تعیین کانه‌زایی و باروری ماگماتیسیم مرتبط با آنها، تکنونوماگماتیسیم و تعیین خاستگاه ماگما، آلاینده‌گی پوسته‌ای یا رخدادهای آبیگری و متاسوماتیسیم گوشته اهمیت دارد (Zarasvandi et al., 2005, 2015). در تعیین سری ماگمایی از داده‌های مربوط به تجزیه شیمی عنصرهای کمیاب بهره برده‌ایم. در مجموع همه این عناصر کمابیش نامتحرک هستند و تحت‌تأثیر فرایندهای مربوط به

جدول ۱. داده‌های عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب کانسار مس پورفیری کوه‌کپوت از توده آذرین درونی کوارتز دیوریت (Qz dr=Quartz diorite).

Table 1. Trace elements and rare earth elements data of Kuh-Kapout Cu porphyry deposit (Qz dr=Quartz diorite).

Sample	NT-3-266	NT-3-268	NT-3-270	NT-3-272	NT-3-274	NT-3-276	NT-3-278	NT-3-280
Lithology	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr
Ba	160	83	75	82	152	104	88	81
Rb	70	45	35	32	51	53	70	67
Th	7.8	7.8	7.14	7.23	7.07	6.7	6.04	5.56
U	1.7	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	1	1
Ta	0.7	0.69	0.82	0.72	0.96	0.56	0.89	0.55
Nb	7.7	8	7.1	6.5	6.8	6.6	9.2	7.1
Sr	257.8	227	317	213.6	156	334.1	277.3	233.2
Hf	1.81	2.02	1.78	1.92	2	1.69	1.71	1.52

جدول ۱. ادامه.

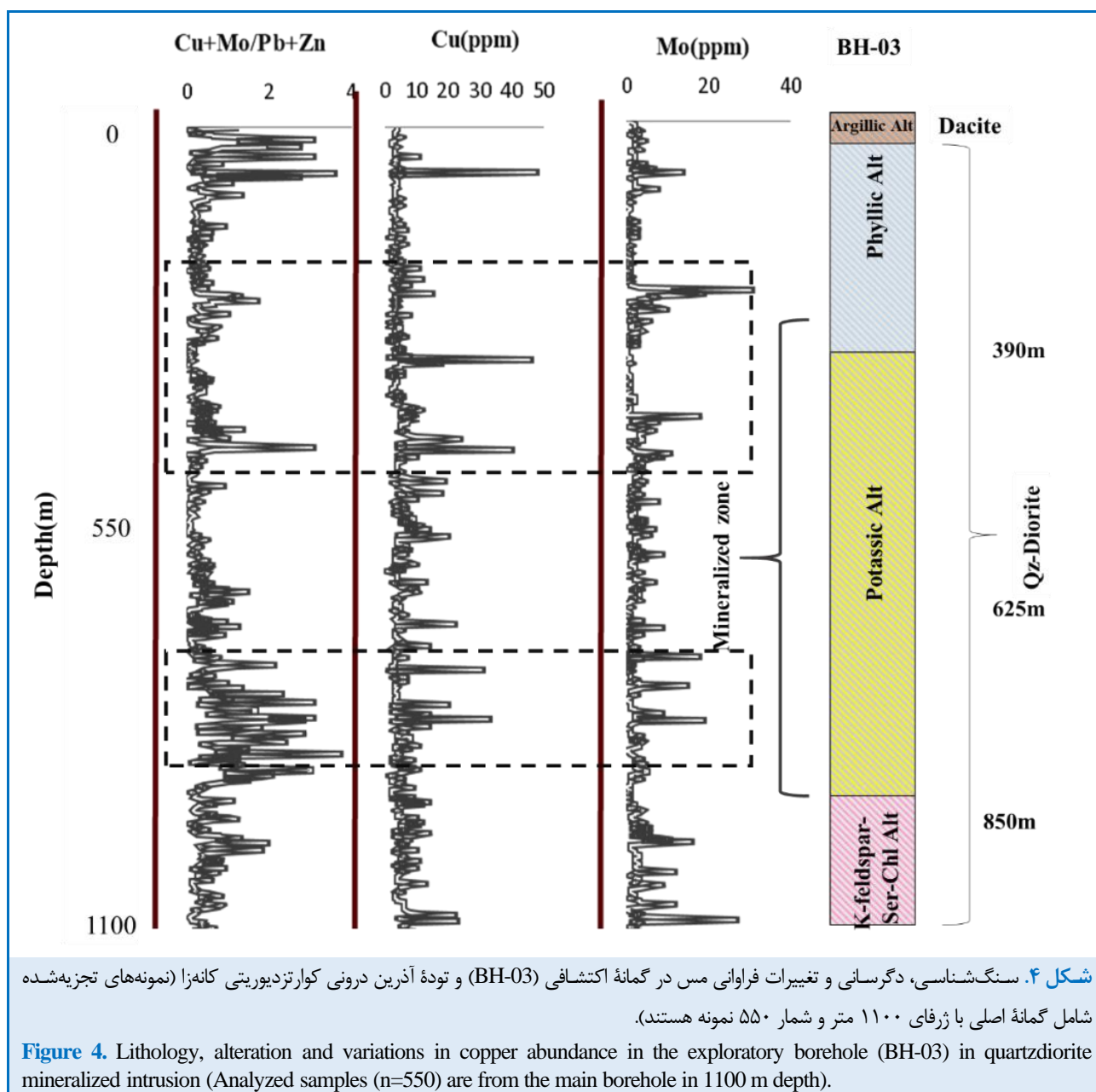
Table 1. Continued.

Sample	NT-3-266	NT-3-268	NT-3-270	NT-3-272	NT-3-274	NT-3-276	NT-3-278	NT-3-280
Lithology	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr
Y	13.2	10.8	10.7	10.8	11	11.3	13.1	12.1
Cs	1.4	1.3	1	0.9	1.7	1.4	1.5	1.4
K	15948	10694	8571	8564	14412	13096	13353	13145
Ti	3030	2171	1970	1850	1685	1613	2034	1883
Zr	66	31	35	44	53	30	25	27
P	637	516	538	597	623	536	520	481
Co	5.3	7.9	7.2	7.6	8.6	10.4	4.4	6.9
Cr	8	8	8	9	6	6	8	9
Cu	3	4	2	3	2	5	5	3
Mo	2	1	5	4	2	1	1	3
Ni	5	2	1	1	1	1	1	1
Sc	10.6	8.7	9	9.8	10.7	9	9.2	8.5
V	76	63	64	64	72	65	66	55
Zn	18	13	9	11	10	12	12	14
La	25	21	23	23	25	22	15	13
Ce	51	42	45	46	49	43	31	27
Pr	5.72	5.28	5.44	5.32	6.14	5.01	3.85	3.25
Nd	22.8	20.1	23.3	21.7	23.8	20.4	16.3	14.5
Sm	2.01	3.96	4.19	4.18	4.72	4.17	3.63	3.12
Eu	0.78	0.97	0.97	0.94	1.13	1.1	0.83	0.81
Gd	2.81	3.59	3.78	3.59	3.83	3.5	3.59	3.15
Tb	0.45	0.47	0.47	0.51	0.51	0.54	0.57	0.48
Dy	2.73	2.23	2.12	2.02	2.01	2.26	2.48	2.54
Er	1.27	1.21	1.21	1.1	1.1	1.26	1.39	1.58
Yb	1.5	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5	1.4
Lu	0.2	0.18	0.11	0.14	0.15	0.16	0.17	0.16
ΣREEs	116.27	102.29	110.79	109.7	118.69	104.7	80.31	70.99
Eu/Eu*	1.003514	0.786605	0.745244	0.741946	0.812621	0.880381	0.703003	0.790009
(Dy/Yb)_{CN}	1.181304	1.113402	1.146687	1.092598	1.003559	1.12838	1.073126	1.177595

جدول ۱. ادامه.

Table 1. Continued.

Sample	NT-3-282	NT-3-284	NT-3-286	NT-3-288	NT-3-290	NT-3-292	NT-3-294	NT-3-296
Lithology	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr	Qz dr
Trace Elements (ppm)								
Ba	78	85	112	175	53	116	49	143
Rb	49	78	62	39	19	30	16	17
Th	6.4	6.65	7.71	8.03	7.3	7.66	7.91	8.34
U	1.3	1.2	1.6	2	1.6	1.7	1.6	1.9
Ta	0.67	0.95	0.88	0.63	0.65	0.91	0.45	0.9
Nb	7.8	9.7	11.1	10.2	9	9.7	6.9	9.7
Sr	282.7	177.4	222.2	169	202.8	184.4	149.3	149.6
Hf	1.79	1.72	2.19	2.25	1.88	2.01	1.67	1.84
Y	14.6	14.8	13.8	15.6	15.6	15.5	13.8	15.6
Cs	1.2	2.7	2.2	2.1	1	1.4	1.2	1.2
K	10372	19626	13947	9345	5294	7214	4311	4843
Ti	2499	2631	2850	3144	2730	3006	3119	3199
Zr	34	33	41	42	35	52	28	40
P	558	528	564	585	597	595	570	589
Co	14.8	9.7	11.1	6	7.5	9	7.7	4.7
Cr	7	8	10	11	47	13	12	11
Cu	3	4	5	3	6	2	3	2
Mo	4	3	2	1	0.1	2	0.1	1
Ni	2	1	3	1	1	1	1	2
Sc	9.7	9.6	9.6	11.4	10.4	11.8	10.9	11.9
V	71	71	72	80	72	84	76	78
Zn	15	10	14	627	19	31	46	48
La	14	16	22	22	22	22	22	25
Ce	31	34	45	45	46	46	44	50
Pr	3.65	4.23	5.52	5.73	5.57	5.42	4.85	5.85
Nd	15.2	17.6	24.4	24	22.6	21.5	20	24.6
Sm	3.67	3.57	4.45	4.46	4.34	4	3.75	4.46
Eu	0.94	1.08	1	1.2	1.09	0.96	0.96	1.17
Gd	3.22	3.53	3.84	4.06	4.4	3.89	3.83	4.23
Tb	0.55	0.57	0.65	0.61	0.67	0.62	0.54	0.59
Dy	2.83	2.76	2.99	3.39	3.36	2.75	2.47	3.15
Er	1.74	1.79	1.88	2.01	1.74	1.59	1.59	1.61
Yb	1.5	1.7	1.6	1.6	1.6	1.8	1.4	1.6
Lu	0.17	0.2	0.22	0.23	0.23	0.2	0.22	0.2
Eu/Eu*	0.836078	0.930212	0.739664	0.862245	0.762667	0.744126	0.774526	0.823622
(Dy/Yb)_{CN}	1.224576	1.053782	1.212946	1.375214	1.363044	0.991632	1.145142	1.277853

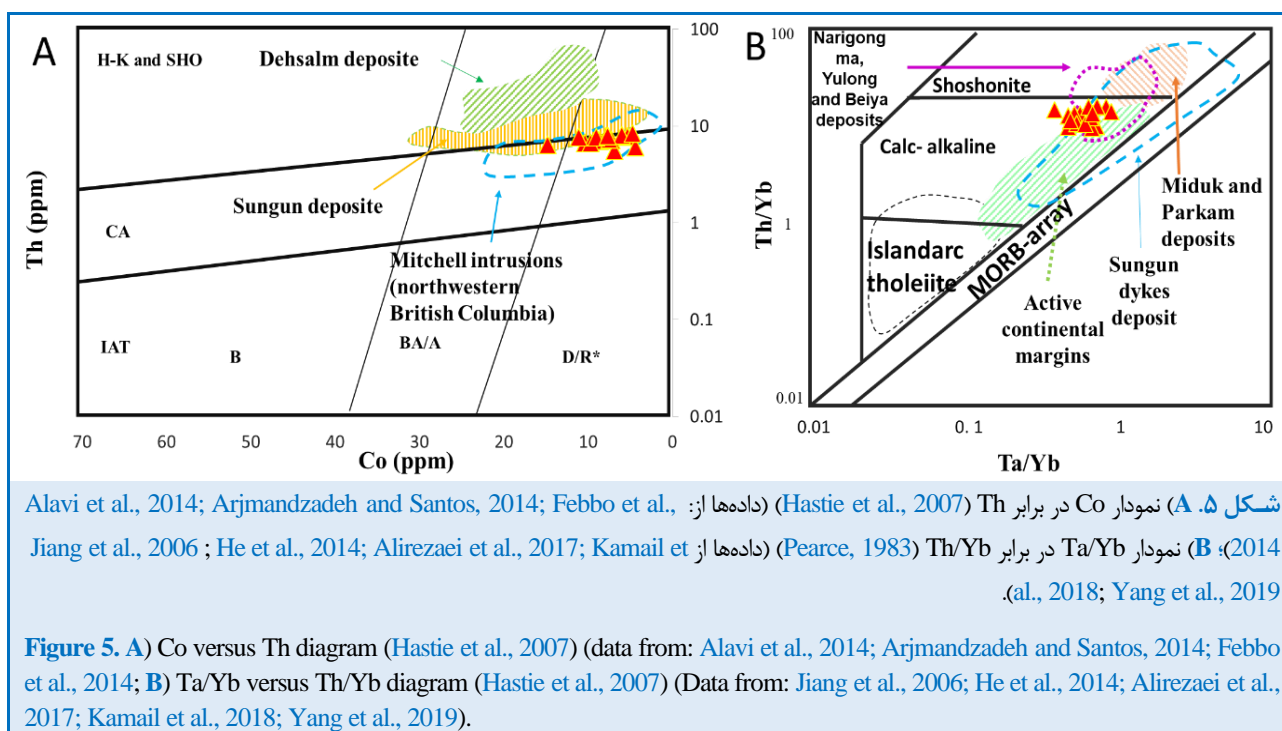


MORB جای می‌گیرند (شکل ۵-B). در کانسار کوه کیوت، فراوانی عنصرها نشان‌دهنده رخداد ماگماتیسم کمانی از سری کالک‌آلکالن است و نمونه‌ها در مرز با ناحیه شوشونیتی جای می‌گیرند. الگوی استاندارد برای فرورانش در طول فانروزویک شامل بی‌آب‌شدن سنگ‌کره اقیانوسی فرورانده شده است که منجر به دگرنهادشدن و ذوب‌بخشی گوه گشته‌ای سست‌کره‌ای پوشاننده (e.g., Delavari and Damghani, 2022). صعود ماگمای آبدار و اکسیدشده به سنگ‌کره بالایی، تفکیک و برهم‌کنش این ماگماها با سنگ‌های پوسته و جایگیری

نمودار Co در برابر Th نشان می‌دهد بیشتر نمونه‌ها در این پژوهش در گستره ماگمای با سرشت کالک‌آلکالن جای گرفته‌اند (شکل ۵-A). در محیط‌های فرورانش برخی عنصرها مانند Yb و Ta در تیغه فرورونده به جای می‌مانند و عنصرهای محافظه‌کار دانسته می‌شوند؛ اما دیگر عنصرها را سیال یا مذاب به گوه گشته منتقل می‌کنند (Pearce and Peate, 1995). با فرض اینکه عنصری غیر محافظه‌کار در نمودارهای مقایسه‌ای $Th/Yb - Ta/Yb$ همانند Th به کار برده شود، داده‌های کمان آتشفشانی در این نوع از سیستم‌ها روی مرز

آب برای پیدایش ذخیره معدنی بزرگ ماگمایی (Zarasvandi et al., 2019) و حالت اکسیداسیون ماگمایی و میزان سولفور در فوگاسیته اکسیژن معین است. پس شرایط بهینه پیدایش ذخیره معدنی در کمان‌ها با عمر دراز در جایگاهی است که یک شاره ماگمایی بزرگ به پوسته بالایی می‌رسد و ماگمای اکسیدان و آبدار غنی از سولفور تولید می‌شوند.

در پوسته بالایی و در پایان فرایند آتشفشانی می‌شود. خروج سیال‌های گرمایی ماگمایی در پوسته بالایی پیدایش ذخیره‌های معدنی پورفیری و اپی‌ترمال را به دنبال داشته باشد. متغیرهایی که بر پتانسیل فلزایی چنین سیستم‌های فرورانشی تاثیر می‌گذارند عبارت از شار ماگما (و میزان فلز) که به محیط پیدایش ذخیره در پوسته بالایی می‌رسد، میزان آب ماگمایی (میزان بالای

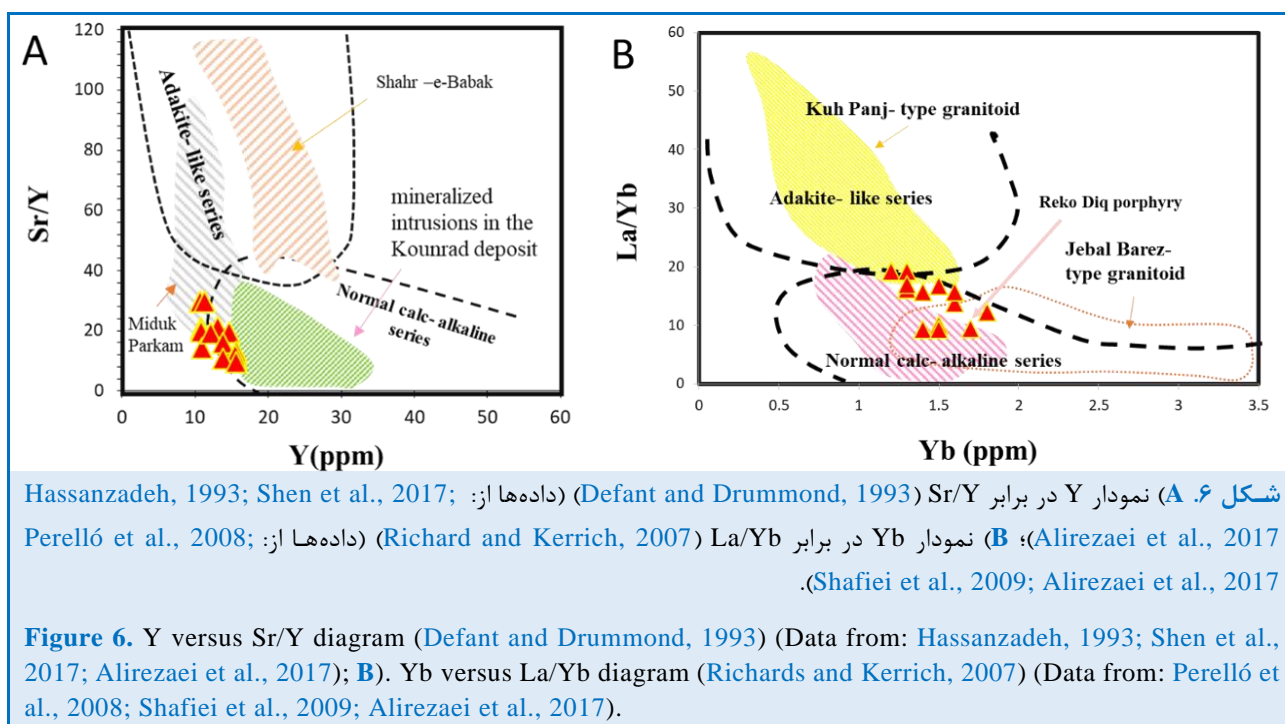


آمفیبول برای Sr/Y و La/Yb کمابیش بالا در ماگماهای سازنده اندوخته‌های مس پورفیری یک نشانه شیمیایی شمرده می‌شود و از ویژگی‌های آداکت‌ها شناخته می‌شود که شاخص یک محیط اکسیدان و ماگماتیسیم آبدار در خاستگاه است. افزون بر این، به پیشنهاد تانگ و همکاران (Tang et al., 2019)، تفکیک Fe^{+2} در گارنت به Fe^{+3} ترجیح دارد که به‌طور بالقوه افزایش fO_2 ثبت‌شده در این سنگ‌ها را در پی دارد. به این ترتیب توده‌های آذرین درونی سازنده اندوخته‌های مس پورفیری بارور از نابارور توسط حالت اکسیدان بالا و مقدار بالای Sr/Y و La/Yb شناخته می‌شوند. در پهنه ماگمایی ارومیه- دختر جایگیری اندوخته‌های پورفیری با روند افزایش تکامل کمان و ضخامت پوسته و به دنبال آن،

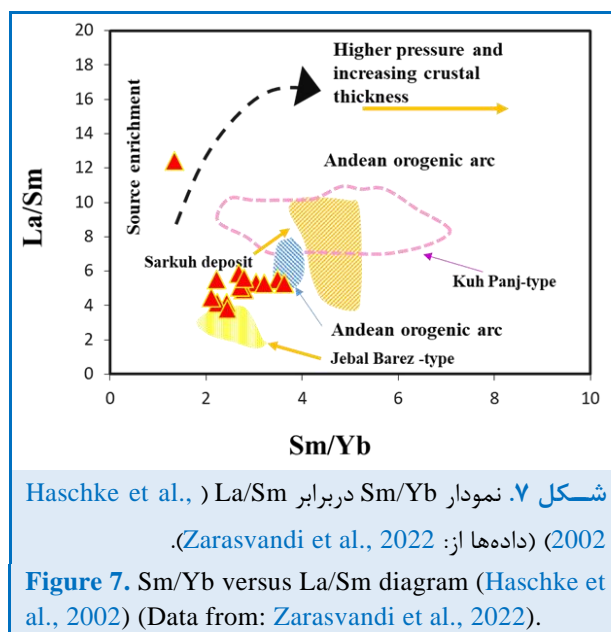
شواهد تجربی، وضعیت اکسیداسیون بالای ماگماهای کمان مولد ذخایر پورفیری مس را نشان داده‌اند (Park et al., 2021). این ماگماها معمولاً مقدار فوگاسیته اکسیژن (fO_2) برابر یا بیشتر از بافر Ni-NiO را ثبت کرده‌اند (Sun et al., 2015). علت حالت‌های اکسیداسیون کمابیش بالا در ماگماهای کمان به‌ویژه ماگماهای کمان سازنده اندوخته‌های مس پورفیری نسبت به بیشتر جایگاه‌های تکتونوماگمایی دیگر، که به‌تازگی پیشنهاد شده‌اند، شامل برجای‌ماندن گارنت در ترکیب بجامانده مذاب است (Tang et al., 2020; Lee and Tang, 2020). از آنجایی که عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREEs) در گارنت (آمفیبول) نسبت به Sr و LREEs بسیار تفکیک‌پذیر هستند، تفکیک گارنت و

ماگمایی پهنه‌آرومیه-دختر موجب پایداری گارنت در محل خاستگاه پیدایش ماگما و تولید ماگمای آداکیتی شده است فشارش ناشی از برخورد صفحه‌ها (Shafiei et al., 2009)، همچنین، ذوب‌بخشی پوسته‌قاره‌ای زیرین است. دیگر فرایندی که پیدایش ماگمای خاستگاه در حضور گارنت را در پی دارد، ماگماتیسیم ناشی از سنگ‌کره‌گوشته‌ای دگرنهاده و تعدیل‌یافته است (Asadi, 2018). رخداد ضخیم‌شدن پوسته در بسیاری از کانسارهای نوع کوه‌پنج در تولید ماگما دخیل بوده است. نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb را می‌توان برای تفسیر فرایندهای افزایش ضخامت پوسته در تولید ماگمای بارور مولد کانه‌زایی و یا رخدادهای غنی‌شدگی خاستگاه به کار برد. نمونه‌های رسم‌شده در نمودار Sm/Yb در برابر La/Sm روندی از افزایش ضخامت پوسته‌ای را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده مقادیر افزایش‌یافته La/Sm با Sm/Yb است که در نمونه‌های برخوردی گسترش یافته‌اند. این روند نشان می‌دهد ماگماتیسیم، غنی‌شدگی تدریجی LREE در ناحیه خاستگاه پوسته‌زیرین و یا آلودگی پوسته‌ای در بخش‌های ژرف پوسته (MASH zone) را به همراه داشته است. از نظر نسبت عنصری یادشده در بالا، نمونه‌های کانسار کوه‌کپوت میان ناحیه جبال بارز و کوه‌پنج روی نمودار جای گرفته‌اند (شکل ۷) که روندی مایل به رخداد ماگماتیسیم مرتبط با ضخیم‌شدن پوسته دارد. از آنجایی که سرشت ماگما بیشتر نشان‌دهنده رخداد ماگماتیسیم کالک‌آلکان (شکل ۷) است، اثرات رخداد برخورد قاره‌ای روی ماگماتیسیم کالک‌آلکان کمان‌بالغ در منطقه مورد مطالعه را می‌توان ارزیابی کرد. برخلاف الگوهای کلاسیک مربوط به فرورانش، به‌تازگی بررسی‌ها نشان می‌دهند بیشتر پورفیری‌های بارور میوسن از ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای مافیک ضخیم‌شده پدید آمده‌اند که در آن فشرده‌شدن و کوتاه‌شدن زمین‌ساختی منجر به گسترش یک منطقه ذوب گارنت-آمفیبولیت در پوسته‌زیرین هنگام برخورد قاره-قاره می‌شود (Shafiei et al., 2009).

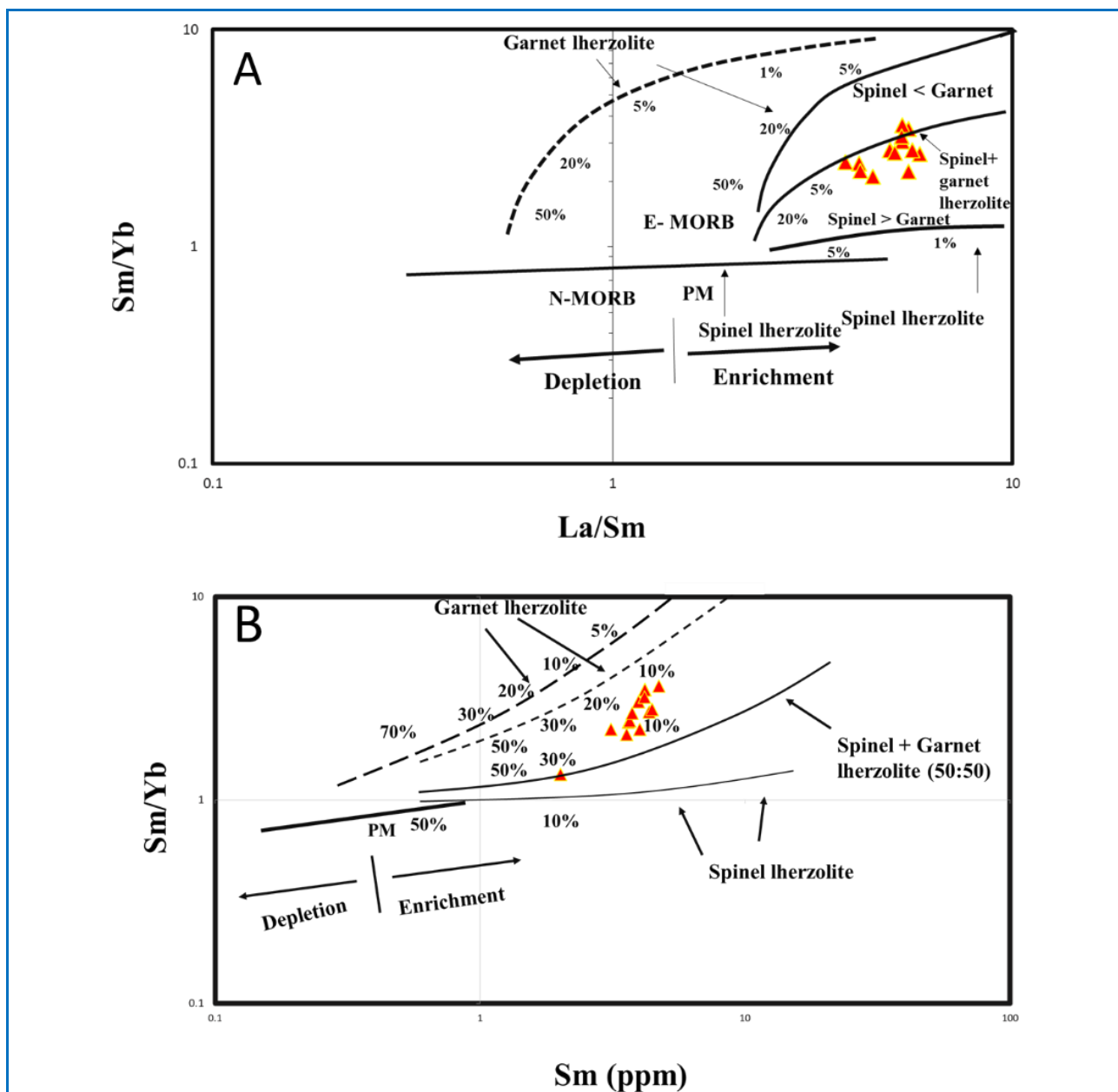
انتقال ماگماتیسیم از کالک‌آلکان نرمال آندزیتی به وابسته به ماگماتیسیم شبه‌آداکیت و پتاسیم بالای کالک‌آلکان دیده می‌شود (Zarasvandi et al., 2018). سیستم‌های پورفیری بزرگ در کمربند ماگمایی آرومیه-دختر به شدت به توده‌های آذرین درونی Sr/Y بالای شبه‌آداکیت میوسن که نزدیک به سی میلیون سال پیش جایگیری کرده‌اند مرتبط هستند (Zarasvandi et al., 2018). برای تعیین نرخ تفکیک عنصرهای کمیاب، نمودار Y-Sr/Y به کار برده می‌شود (شکل ۶-A) این نسبت نشان‌دهنده تفکیک پلاژیوکلاز (Sr) در برابر تفکیک HREEs-Y است. بر پایه این نمودار ویژگی آداکیت در سنگ‌های آذرین مرتبط با اندوخته‌های مس پورفیری بارور دیده می‌شود که با نسبت‌های بالا از Sr/Y سنگ آذرین درونی شناسایی می‌شوند (Richards, 2003). این ویژگی زمین‌شیمیایی پیامد نبود تفکیک پلاژیوکلاز در خاستگاه یا بقایای پلاژیوکلاز در مذاب بجامانده و یا بر پایه نمودار La/Yb در برابر Yb پیامد حضور گارنت در خاستگاه دانسته می‌شود (شکل ۶-B). داده‌ها نشان می‌دهند ماگماتیسیم مسئول کانه‌زایی در کانسار مس پورفیری کوه‌کپوت طبیعت کالک‌آلکان نرمال دارد و به ویژگی‌های شبه‌آداکیت گرایش اندکی نشان می‌دهد. این می‌تواند نشان‌دهنده تفکیک گارنت در نبود حضور پلاژیوکلاز بالا و اکسیدان بودن ماگماتیسیم باشد. مقادیرهای Eu/Eu^* $(Eu_n/(Sm_n \times Gd_n))^{1/2}$ در شرایط نبود پایداری پلاژیوکلاز در خاستگاه مقادیر منفی در مذاب نشان نمی‌دهند که از این نظر همانند Sr عمل می‌کند و شاخص یک ماگماتیسیم اکسیدان است (Richards et al., 2012). در اینجا مقادیرهای Eu/Eu^* از ۰/۷ تا ۱ و میانگین ۰/۸ کمابیش منفی هستند که چه‌بسا گویای پیشگیری از تفکیک پلاژیوکلاز به دلیل تکامل ماگما به‌سوی محتوای آب و مواد فرار بالا در خاستگاه باشد (Zarasvandi et al., 2015). در این حالت کانی هورنبلند تبلور یافته است و در هنگام تکامل ماگما به‌صورت ترجیحی Y و MREE را جذب می‌کند (Richards et al., 2012). آنچه در بسیاری از ذخایر



در این حال نسبت Sm/Yb (Aldanmaz et al., 2000). شاید تغییر ندهد؛ زیرا Sm و Yb ضریب تفکیک جزئی مشابهی دارند (Dong et al., 2007). این روند ذوب نشان‌دهنده روندهای موازی با روند گوشته اولیه است در حالیکه ذوب‌بخشی گارنت لرزولیت روندهای ذوب شیب‌دار دارد (Zhao and Zhou, 2007). در نمودارهای Sm/Yb در برابر La/Sm و Sm/Yb در برابر Sm ، توده آذرین درونی کوه‌کیوت نسبت‌های Sm/Yb بالاتری نسبت به آنچه به‌صورت معمول برای روند ذوب اسپینل لرزولیت دیده می‌شود نشان می‌دهد (شکل‌های A-8 و B-8). نمودار تنوع بالایی از مقدار Sm را نشان می‌دهد و همه نمونه‌ها در این کانسار در میان روند ذوب اسپینل گارنت لرزولیت و گارنت لرزولیت و در نزدیکی بردار اسپینل+گارنت لرزولیت جای گرفته‌اند. نمودار Sm/Yb در برابر La/Sm نشان‌دهنده نزدیک به ۵ درصد ذوب‌بخشی ماگمای خاستگاه است. به‌طور کلی، آنچه از نمودارها برداشت می‌شود اینست که پیدایش مذاب از خاستگاه اسپینل+گارنت لرزولیتی در پی نزدیک به ۵ تا ۱۰ درصد ذوب‌بخشی روی داده است.



ترکیب خاستگاه گوشته و درجه ذوب‌بخشی توسط فراوانی REEs و نسبت‌های میان آنها شناخته می‌شود. با توجه به شرایط فیزیکوشیمیایی، گوشته ترکیب متنوعی دارد. ذوب‌بخشی یک خاستگاه گوشته اسپینل لرزولیت باید کاهش‌دهنده نسبت La/Sm و محتوی Sm مذاب باشد



شکل ۸. A) نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb؛ B) نمودار Sm در برابر Sm/Yb (Aldanmaz et al., 2000) و رخداد ذوب بخشی از خاستگاه گوشته اسپینل + گارنت لرزولیت. اعداد روی نمودار میزان ذوب بخشی را نشان می‌دهند. منحنی‌های ذوب برای اسپینل لرزولیت (Ol₅₃ + Op_{x27} + Cp_{x17} + Sp₁₁) و گارنت پریدوتیت (Ol₆₀ + Op_{x20} + Cp_{x10} + Gt₁₀)، E-MORB، N-MORB و گوشته اولیه (PM).

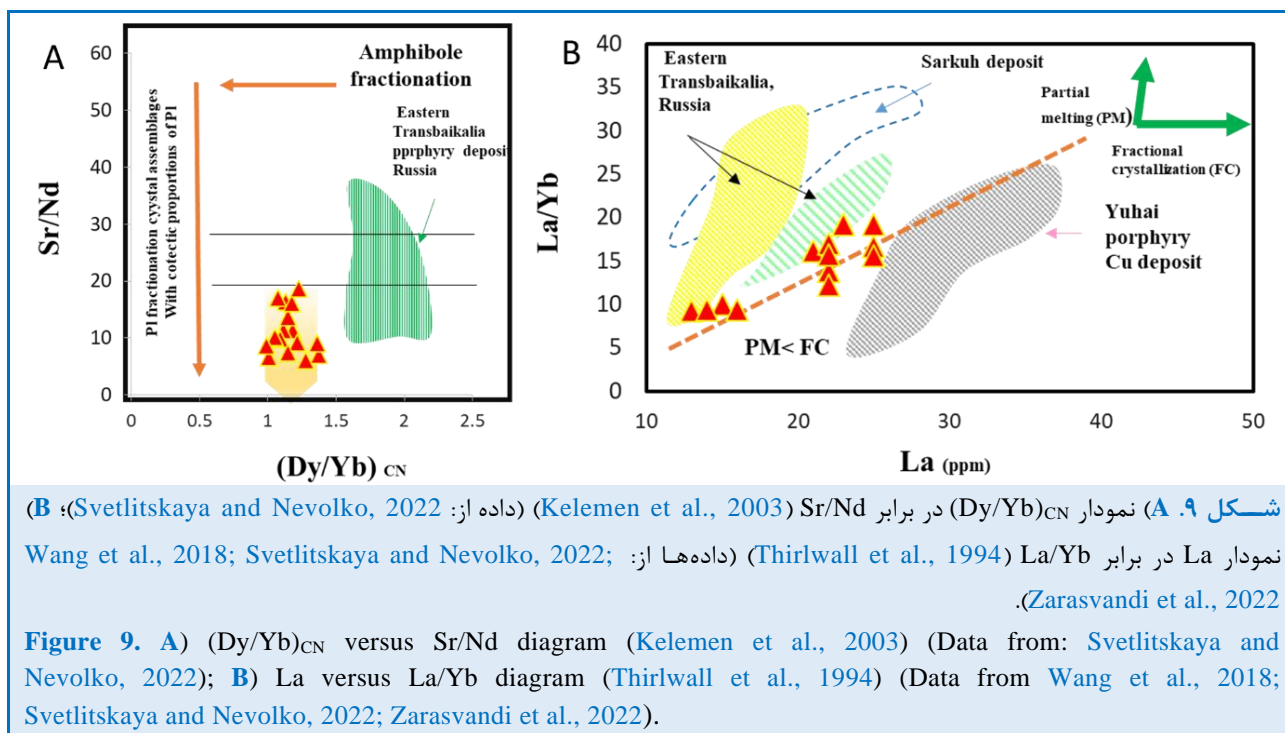
Figure 8. A) La/Sm versus Sm/Yb diagram; B) Sm versus Sm/Yb diagram (Aldanmaz et al., 2000) and the partial melting event of the spinel + garnet lherzolite mantle origin. The numbers on the graph show the degree of partial melting. Melting curves for lherzolite spinel (Ol₅₃+Op_{x27}+Cp_{x17}+Sp₁₁) and peridotite garnet (Ol₆₀+Op_{x20}+Cp_{x10}+Gt₁₀), E-MORB, N-MORB and primitive mantle (PM).

نمودار مقدارهای کم نسبت Sr/Nd (کمتر از ۲۰) دیده می‌شوند و نمودار Sr/Nd در برابر (Dy/Yb)_{CN} همبستگی مثبت نشان می‌دهد (شکل ۹-A). به‌طور کلی نسبت‌های

داده‌ها روی نمودار (Dy/Yb)_{CN} در برابر Sr/Nd نشان می‌دهد تفکیک پلاژیوکلاز در سطح کم ژرفا در تکامل ماگما مؤثر بوده است (Kelemen et al., 2003). در این

خاستگاه اهمیت داشته باشد. اگر آمفیبول و فلوگوپیت هنگام ذوب‌بخشی یا تفکیک از مذاب خارج شوند روی رخداد ویژگی‌های به‌خصوص ماگما در تفکیک عنصرهای کمیاب مؤثر خواهد بود (Green, 1994). ضرایب تفکیک منتشرشده برای عنصرهای Rb, Ba, Ti و K در کانی آمفیبول و فلوگوپیت از کمابیش ناسازگار تا کاملاً سازگار در نوسان است و تمایل دارند تا عنصرهای REEs در واسط (MREE) را نسبت به HREEs و LREEs تغلیظ کنند (Panter et al., 2000). آمفیبول و فلوگوپیت کانی‌های پایدار در شرایط P-T گوشته بالایی هستند که با ژرفای خاستگاه بیشتر ماگماهای آلکالن همخوانی دارند (Mengel and Green, 1989). نمودار La در برابر La/Yb نشان می‌دهد هر دو فرایند ذوب‌بخشی و تبلوربخشی در پیدایش ماگمای پورفیری کوه‌کیوت مؤثر بوده‌اند (شکل ۹-ب).

معدال میانگین $(Dy/Yb)_{CN}$ و $La/Yb = 14/38$ و مقادیرهای کم Yb برابر با میانگین $1/16 ppm$ و $1/468 ppm$ هستند. به این ترتیب مذاب سازنده پالس ماگمایی در کانسار کوه‌کیوت ترکیب مافیک تا حد واسط، کمابیش آبدار و غنی از سیال داشته است که با ادغام ماگما از مواد گارنت‌دار شکل گرفته است و هنگام برهمکنش ماگما با پوسته زیرین در جایگاه ژرف آشیانه ماگمایی پیش از تبلور تکامل یافته است (Kelemen et al., 2003). به‌طور کلی، به لحاظ فرایندهای مؤثر ماگماتیسم مولد کانه‌زایی در اینجا، ذوب‌بخشی درجه پایین و تفکیک اولیه آمفیبول در ژرفا و سپس تفکیک کم ژرفای پلاژیوکلاز از عوامل مهم تولید مذاب بارور هستند (Loucks, 2014). در روند تکامل ماگمای منطقه کوه‌کیوت، فرایند تبلوربخشی مهم‌تر از ذوب‌بخشی رفتار کرده است. این مسئله می‌تواند در تعیین ترکیب ماگمای

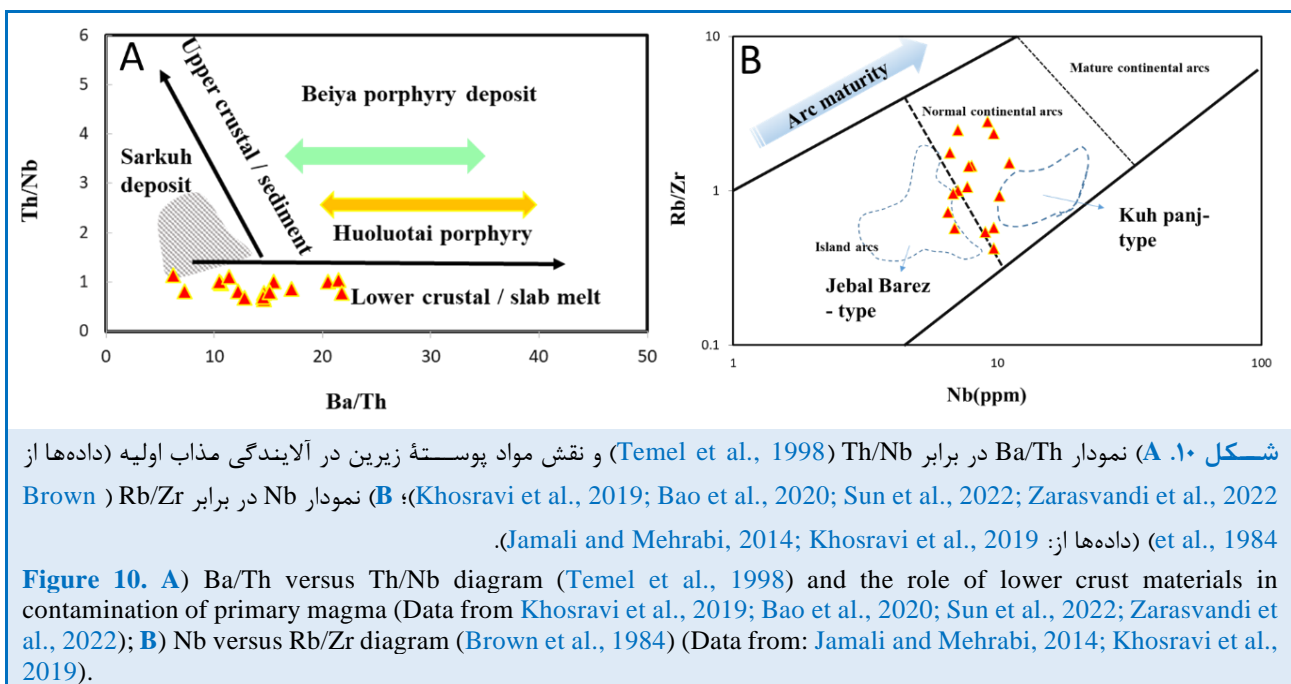


فرورونده و یا پوسته زیرین با ماگما و تأثیر بیشتر روند مرتبط با غنی‌شدگی ناشی از سیال ماگما، نسبت به غنی‌شدگی مرتبط با گوشته غنی‌شده در خاستگاه ماگما رخداد داده است (Ajalli et al., 2021) (شکل ۱۰-ا) و در پایان، بررسی نمونه‌ها در این کانسار خاستگاه ماگمای

همان‌گونه که گفته شد، روند ضخیم‌شدگی پوسته در نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb می‌تواند عاملی برای رخداد آلاینده‌گی پوسته‌ای پس از ذوب در این ناحیه تفسیر شود. مقادیرهای Ba/Th بالا در برابر مقادیرهای Th/Nb کم نشان می‌دهند آلودگی ماگما با مواد تیغه

نرمال جای گرفته‌اند که مشلبه با رخداد گرانیوتیویدهای کانه‌زای مس پورفیری نوع کوه‌پنج است (شکل ۱۰-B) که نشان‌دهنده ماگماتیسم کمان بالغ هستند و ویژگی کمان‌های بالغ برخوردار را دارند (Richards, 2015). تغییرات زمین‌ساختی در مسیر تکامل کمان می‌تواند ضخامت پوسته‌ای را افزایش دهد و تمایز طولانی مدت ماگما و تبلور غالب آمفیبول در شرایط H_2O محلول بالا و تولید مذاب آبدار را به دنبال داشته باشد (Huang et al., 2024).

آلوده با پوسته زیرین و یا مواد حاصل از فرورانش را نشان می‌دهد (Temel et al., 1998) بر پایه نمودار Rb/Zr در برابر Nb، گرانیوتیویدهای مسئول کانه‌زایی اقتصادی در ذخایر مس پورفیری ایران در پهنه ارومیه - دختر به سن میوسن بالایی و میانی در محدوده کمان قاره‌ای نرمال جای دارند و کانسارهای نوع جبال بارز با ویژگی نیمه‌اقتصادی و به سن ائوسن و الیگوسن در محدوده جزیره‌های کمانی جای گرفته‌اند. نمونه‌های مس پورفیری کوه‌کپوت بیشتر روی این نمودار در ناحیه کمان قاره‌ای



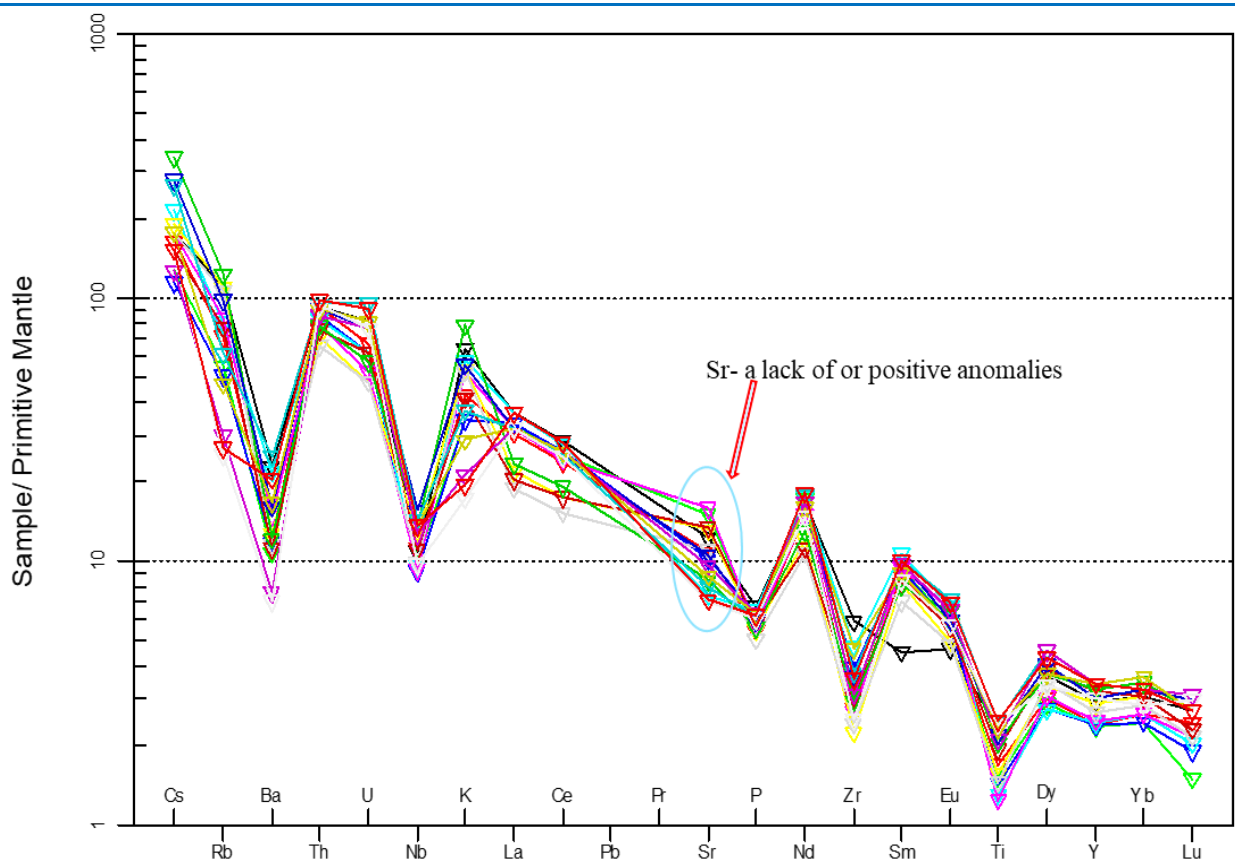
در ماگمای تحول یافته می‌شود، رخداد آنومالی منفی در این عنصرها از سویی می‌تواند خاستگاهی از آلاینده‌گی پوسته‌ای با مواد مذاب در هنگام صعود آنها به سطح داشته باشد. آنومالی‌های منفی در HFSEs در پهنه فرورانش از ویژگی‌های ماگمای کمان است (Nicholson et al., 2004) در توده آذرین درونی کانسار مس کوه‌کپوت آنومالی منفی Ba, Nb, P, Zr, Ti و Lu و آنومالی مثبت Cs, Rb, Th, U, K, Nd, Sm, Eu, Dy و Y دیده می‌شود. آنومالی مثبت Rb, Th و U از ویژگی‌های کمان آتشفشانی هستند. آنومالی منفی Nb ویژگی ماگمای ناشی از پهنه فرورانش است و آنومالی مثبت آن نشان‌دهنده رخداد آلودگی پوسته قاره‌ای است (Asran et al., 2012). آنومالی منفی Ti و

نمودار بهنجار شده عنصرهای کمیاب در برابر ترکیب گوشته اولیه و شیمی عنصرهای کمیاب

عنصرهای کمیاب با شدت میدان بالا (HFSEs) در توده آذرین درونی کانسار مس پورفیری کوه‌کپوت آنومالی منفی مشخصی را در بهنجارسازی به گوشته اولیه نشان می‌دهند و عنصرهای لیتوفیل با شعاع یونی بالا (LILEs) به علت انحلال پذیری بیشتر نسبت به عنصرهای با شدت میدان بالا و تأثیرپذیری بالاتر نسبت به رخدادهایی مانند دگرسانی گوشته آنومالی مثبت نشان می‌دهند (Ionov and Hofmann, 1995). به جای ماندن عنصرهای با شدت میدان بالا در خاستگاه منجر به مقادیر کم این عنصرها

وجود آنومالی کمابیش منفی Eu و Sr می‌تواند بر حضور میزانی از فازهای پلاژیوکلاز و پتاسیم‌فلدسپار در خاستگاه تاکید کند. بررسی‌های تجربی و بررسی عنصرهای کمیاب نشان داده‌اند بهنجارسازی داده‌های عنصرهای کمیاب به ترکیب گوشته اولیه غلظت بالای نسبی Nb و Ta و آنومالی منفی برای K و Pb همراه با تهی‌شدگی مشخص در Rb و Cs با هرگونه نقش مهمی از تأثیر آلودگی پوسته‌ای در تضاد است (Panter et al., 2000) (شکل ۱۱). در اینجا با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و بهنجارسازی داده‌ها با ترکیب گوشته اولیه یک تهی‌شدگی نسبی در مقدارهای Ba و Nb و غنی‌شدگی نسبی در Rb و Cs به‌خوبی دیده می‌شود که بر پایه نمودارهای Th/Nb برابر Ba/Th و La/Sm در برابر Sm/Yb وجود آلودگی پوسته‌ای با مذاب گوشته‌ای چشمگیر است.

Nb می‌تواند پیامد حضور فازهای روتیل و ایلمنیت یا دیگر اکسیدهای آهن-تیتانیوم در خاستگاه باشد (Martin, 1999). وجود آنومالی منفی در Ti می‌تواند پیامد وجود شرایط با فوگاسیته بالای اکسیژن باشد؛ زیرا نیاز به دمای بالاتر برای ذوب فازهای دارای Ti است که مانع از حضور آنها در فاز مذاب می‌شود (Rollinson, 1993). در حالت کلی آنومالی منفی در HFSEs می‌تواند پیامد حضور فازهای دیرگداز در پوسته اقیانوسی فرورونده (Tatsumi et al., 1986) یا رخداد تهی‌شدگی پیشین در خاستگاه گوشته باشد (Woodhead et al., 1993). در این پژوهش گمان می‌رود به‌علت حضور فازهایی مانند گارنت و هورنبلند در خاستگاه یک تفریق میان عنصرهای با شدت میدان بالا و عنصرهای با شعاع یونی بالا رخ داده باشد (Green, 2006). همچنین، آنومالی منفی Sr پیامد حضور فاز پلاژیوکلاز جدایش‌یافته کم ژرفاست (Martin, 1999).



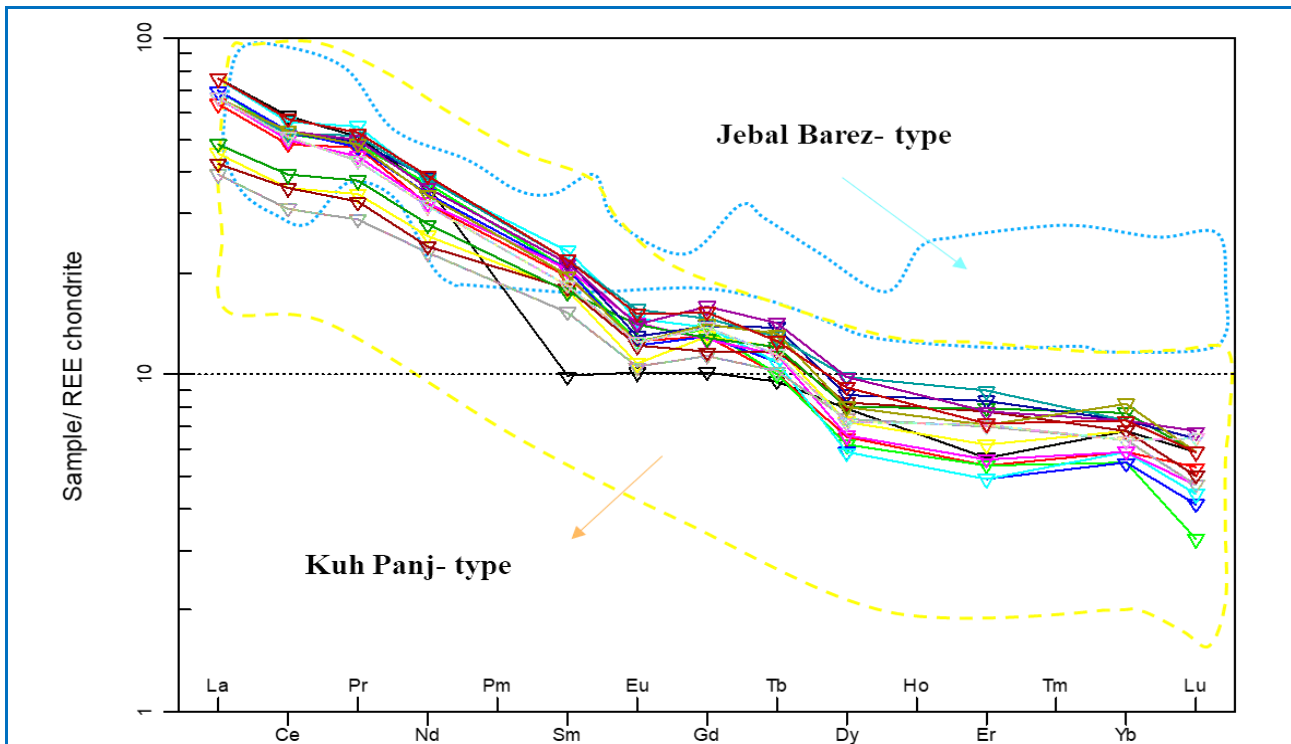
شکل ۱۱. نمودار بهنجارشده عنصرهای کمیاب به ترکیب گوشته اولیه (داده‌های بهنجارسازی از: Sun and McDonough, 1989).

Figure 11. Trace elements Primitive Mantle-normalized diagram (Normalization values from: Sun and McDonough, 1989).

شیمی عنصرهای خاکی کمیاب و بهنجارسازی عنصرهای خاکی کمیاب به کندریت

نتایج داده‌های عنصرهای خاکی کمیاب یک غنی‌شدن نسبی در LREEs نسبت به HREEs نشان می‌دهند. شیب نمودار عنصرهای نشان می‌دهد در بخش عنصرهای خاکی کمیاب سبک به سوی عنصرهای خاکی کمیاب سنگین، یک شیب کاهنده شدید و در بخش عنصرهای خاکی کمیاب حد واسط تا عنصرهای خاکی کمیاب سنگین یک شیب کمابیش ملایم‌تر دیده می‌شود که نشان‌دهنده رخداد تهی‌شدگی شدید در عنصرهای خاکی کمیاب حد واسط است (شکل ۱۲). همان‌گونه که پیشتر نیز گفته شد، نبود آنومالی منفی شدید $Eu_n/(Sm_n \times Gd_n)^{0.5} Eu/Eu^*$ می‌تواند دلیل دیگری بر نبود رخداد تبلور پلاژیوکلاز در ماگما در خاستگاه به‌علت محتوی بالای آب ماگمایی و یا شرایط اکسیداسیون در خاستگاه باشد (Richards et al., 2012) که می‌تواند نقش مؤثر هورنبلند در جذب عنصرهای خاکی کمیاب متوسط را نشان دهد.

آنومالی‌های مثبت Th، K و Rb و آنومالی منفی P، Ti و Sr می‌تواند نشان دهد هنگام تکامل ماگمایی، آلودگی پوسته‌ای رخ داده است (Pearce et al., 1984). غنی‌شدن از عنصر Th و در برابر آن، تهی‌شدن از P می‌تواند پیامد رخداد آلاینده‌ی پوسته‌ای در مسیر تحول ماگمای اولیه باشد (Chappell and White, 2001). نسبت $Nb/La < 0.5$ (در اینجا ۰/۴۱) نشانه خاستگاه گوشته سنگ‌کره دگرنهاده است. تحرک بیشتر La در سیال‌های دگرنهادکننده در هنگام فرورانش نسبت به Nb، این نسبت را در ماگمای محصول دگرنهادشدن کاهش می‌دهد. شواهد آنومالی عنصرهای کمیاب و نسبت‌های عنصرهای کمیاب بر نقش یک ماگماتیسم خاستگاه یافته از کمان و رخدادهای بعدی مانند آلاینده‌ی پوسته‌ی زیرین و سیال دگرنهادکننده تاکید میکند. از سوی دیگر، مقادیرهای کمابیش بالای Ba/Nb معادل میانگین ۱۲/۴۴ از نشانه‌های رخداد ماگماتیسم مرتبط با کمان هستند (Fitton et al., 1991).



شکل ۱۲. نمودار بهنجارشده عنصرهای خاکی کمیاب در برابر ترکیب کندریت (داده‌های بهنجارسازی از: McDonough and Sun, 1995).

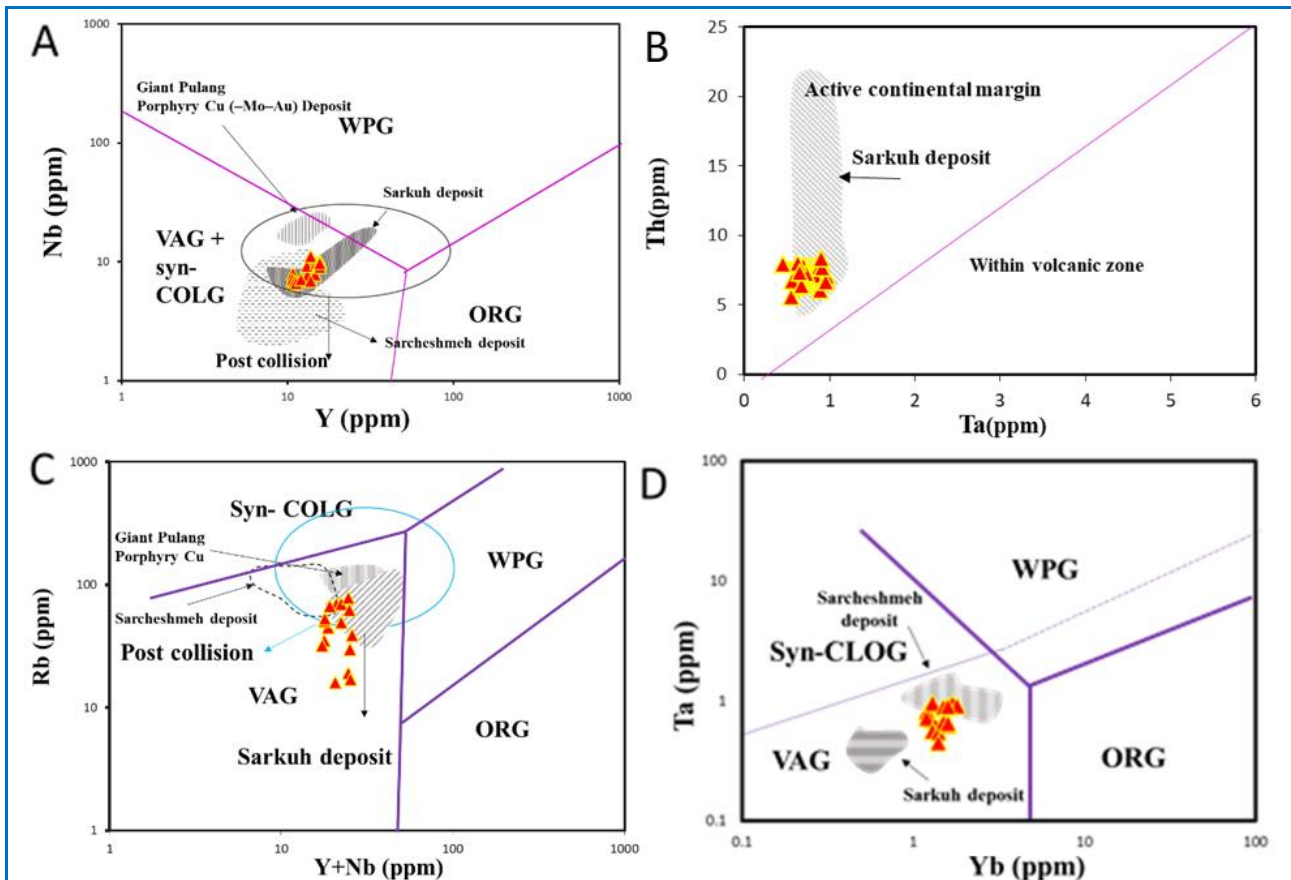
Figure 12. Rare earth elements chondrite-normalized diagram (Normalization values from: McDonough and Sun, 1995).

افزون بر ماگماتیسیم حاصل از ذوب‌بخشی ناشی از گوته‌گوشته‌ای دگرنهاده در جایگاه کمان نرمال، امروزه روشن شده است ماگماتیسیم کانه‌زای نوع ذخیره پورفیری می‌تواند مرتبط با مذاب ناشی از فروانش تعدیل‌یافته از گوته‌گوشته‌ای سنگ‌کره‌ای زیرقاره‌ای و ذوب پوسته‌قاره‌ای زیرین ضخیم‌شده (Cai et al., 2023) و حتی از ماگماتیسیم ناشی از بالآمدن سست‌کره، به‌ویژه در حاشیه صفحه‌های کوهزایی و برخوردی پدید آید و جایگیری کند (Richards, 2011; 2013; 2015). بررسی‌های سن‌سنجی با بررسی روی کمر بند کرمان، زمان برخورد صفحه‌ی عربستان با ایران مرکزی را ائوسن پایانی نشان می‌دهند (Dargahi et al., 2010). داده‌های جدید از سن‌سنجی توده‌های آذرین درونی نوع جبال بارز و کوه پنج نشان‌دهنده رخداد‌های فعال از ۲۳/۰۳ تا ۳۳/۹ (الیگوسن پیشین تا الیگوسن پسین) و ۱۷ تا ۳/۶ میلیون سال پیش (میوسن پیشین تا پلیوسن پیشین) در کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان هستند (Asadi, 2018). با توجه به اینکه توده‌های آذرین درونی منطقه، واحدهای سنگی آتشفشانی منطقه با سن ائوسن میانی تا پایانی را قطع کرده‌اند گمان می‌رود توده‌های آذرین درونی خاستگاه ماگماتیسیم همزمان تا پس از برخورد داشته باشند. برای بررسی محیط زمین‌ساختی کانسار از نمودارهای مرتبط پیشنهادی پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984) بهره گرفته شد. از نمودارهای فراوانی عنصرهای کمیاب در بسیاری از مطالعات (e.g., Najmi et al., 2023) برای تعیین خاستگاه توده‌های آذرین درونی در مناطق با جایگاه زمین‌ساختی مشابه و در کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان استفاده شده است (Mohammaddoost et al., 2023). نمونه‌ها در ناحیه حاشیه فعال قاره‌ای و مرتبط با ماگماتیسیم پس از برخوردی جای می‌گیرند (شکل‌های ۱۳-A تا ۱۳-D). الگوی نمایشی از زمین‌ساخت منطقه و الگوی سنگ‌شناسی و دگرسانی کانسار در شکل ۱۴ آورده شده است.

غنی‌شدگی از LREEs و تهی‌شدگی از HREEs نشان‌دهنده بجاماندن گارنت در خاستگاه و نرخ کم ذوب‌بخشی و یا فوگاسیته بالای CO₂/H₂O و یا ژرفای بالا برای پیدایش ماگمای مادر است (Panter et al., 2000). نسبت‌های (La/Sm)_{CN} با مقدار ۳/۴۵۲ و (La/Yb)_{CN} معادل ۹/۶۹۷ (> ۲۰) نشان‌دهنده غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و خاستگاه گارنت لرزولیت برای ماگمای مادر است (Panter et al., 2000). در اینجا می‌توان الگوهای REEs کمابیش شیب‌دار را برای استنباط بجاماندن گارنت در مذاب بجامانده به کار برد. رخداد‌های ماگماتیسیم با ویژگی‌های کمان (تهی‌شدگی HREEs در برابر LREEs) افزون بر محیط فروانش می‌تواند در ارتباط با رخداد ذوب‌بخشی پوسته‌زیرین جوان و یا پیامد ذوب‌بخشی گوشته‌سنگ‌کره‌ای تعدیل‌یافته حاصل از فروانش باشد (Asadi, 2018).

تکتونوماگماتیسیم و خاستگاه توده آذرین درونی

در تعیین شکل‌های گوناگون ذخایر معدنی در موقعیت مکانی و زمانی به‌ویژه، جایگاه زمین‌ساختی صفحه‌ها نقش مهمی را بازی می‌کند. ارتباط ذخایر مس پورفیری با حاشیه‌های صفحه‌های همگرا و در کوهزایی‌های برخوردی روشن است (Shafiei et al., 2009; Khademian et al., 2022). به‌طور کلی ذخایر پورفیری در مراحل پایانی از تکامل مراکز ماگمایی (John et al., 2010)، تغییرات زمین‌ساختی (Sillitoe, 1997) یا برخی از آشفته‌گی‌های رژیم زمین‌ساختی غالب، به‌عنوان محرکی برای صعود ماگما و تشکیل ذخایر پورفیری پدید می‌آیند (Cooke et al., 2005; Richards et al., 2001; Tosdal and Richards, 2001). این ذخایر به‌طور معمول با سیستم‌های ماگمایی-گرمایی دما بالای خاستگاه‌گرفته از ماگماتیسیم اکسیدان غنی از فلز که در ژرفای کم جایگیری کرده‌اند در ارتباط هستند و از دیدگاه زمین‌ساختی در جایگاه فروانش و یا برخورد صفحه و همچنین، در جایگاه زمین‌ساختی پس‌برخوردی جای دارند (Agard et al., 2011).



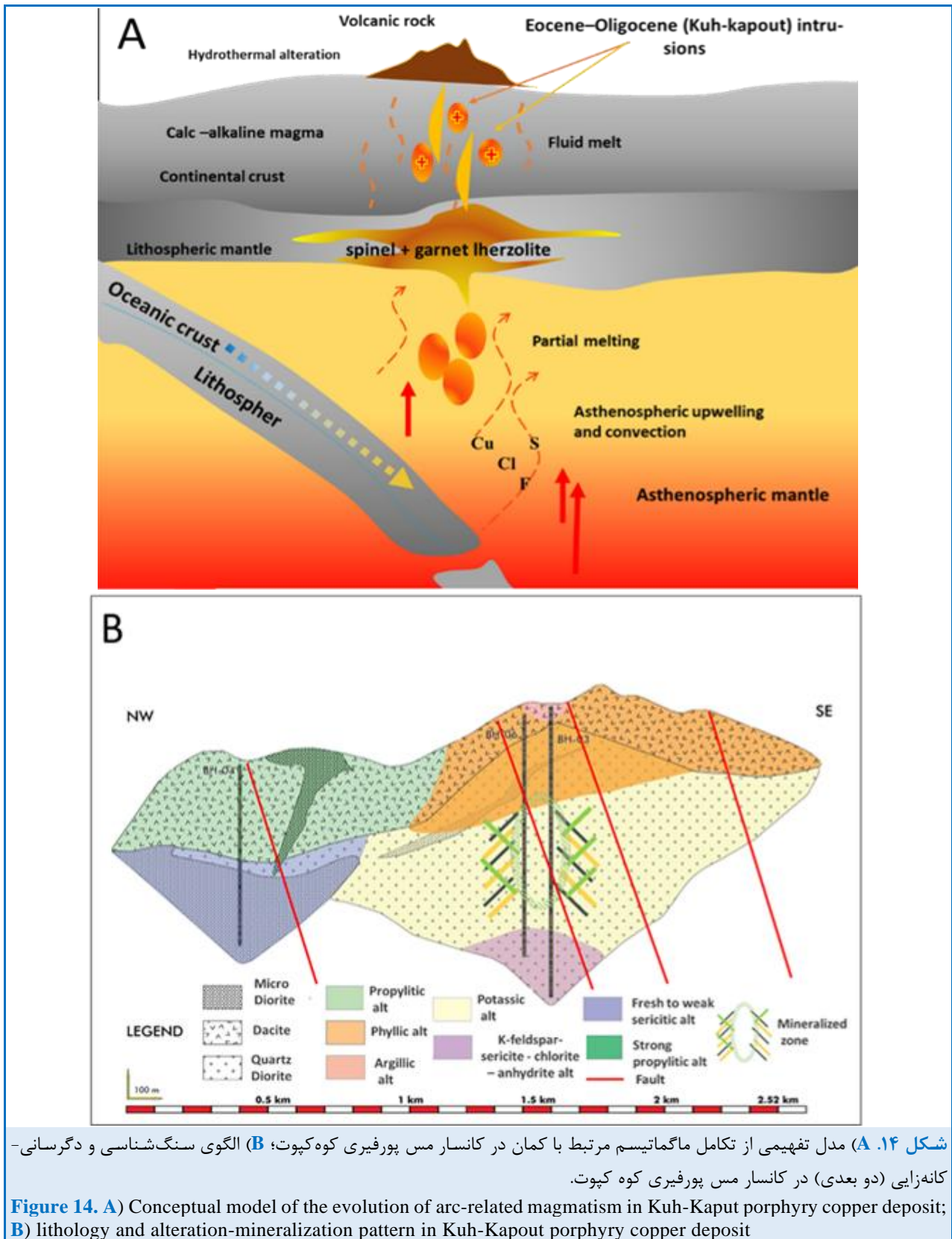
شکل ۱۳. جایگیری نمونه‌ها روی نمودارهای تشخیص محیط زمین‌ساختی (Pearce et al., 1984) (داده‌ها از: Maanijou et al., 2020 ; Yang et al., 2019; Zarasvandi et al., 2022)

Figure 13. Composition of Kuh-Kapout samples on the tectonic environment discrimination diagrams (Pearce et al., 1984) (Data from: Maanijou et al., 2020; Yang et al., 2019; Zarasvandi et al., 2022).

کمیاب در نمودارهای بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه و کندریت گویای تهی‌شدگی HFSEs و HREEs به ترتیب نسبت به LILEs و LREEs است که از ویژگی‌های ماگماتیسم مرتبط با کمان است. ۳- از دیدگاه سیر تحول ماگماتیسم با توجه به تفسیر داده‌های عنصرهای کمیاب از خاستگاه به سطح، می‌توان یک ماگماتیسم ناشی از ذوب‌بخشی از ماگمای اولیه با ترکیب اسپینل+گارنت لرزولیت دگرنهاده در حضور فاز فلوگوپیت و آمفیبول را در نظر گرفت که هنگام صعود، ماگما دچار تبلور پلاژیوکلاز کم‌ژرفا شده است و بیشتر مراحل تکامل تحت‌تأثیر فرایند تبلوربخشی بوده است.

برداشت

- ۱- بر اساس داده‌های عنصرهای کمیاب برای توده آذرین درونی کوارتزدیوریتی منطقه، ماگماتیسم مرتبط با کمان با سری کالک‌آلکان شناسایی شد. کاربرد نسبت میان عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب نشان‌دهنده ماگماتیسم کمابیش اکسیدان و غنی از سیال-آبدار است که در خاستگاه با حضور فازهای گارنت و آمفیبول همراه بوده است. نبود آنومالی منفی شدید Sr و Eu/Eu^* با مقدار میانگین ۰/۸ نشان‌دهنده شرایط پیشگیرانه برای تبلور پلاژیوکلاز در خاستگاه است.
- ۲- بررسی‌ها روی چگونگی رفتار عنصرهای کمیاب و خاکی



و تهی‌شدگی نسبی Nb، Zr و Ti را می‌توان نام برد. این رخداد هنگام فرایند همزمان با فرورانش و برخورد به شکل

۴- همچنین ماگماتیسم به میزانی آلودگی با پوسته زیرین ضخیم‌شده پیدا کرده است که از نشانه‌های آن فراوانی K

کمیاب از داده‌های سنگ کل، در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای و همزمان با برخورد است.

سیاس‌گزاری

این مقاله بخشی از پروژه تحقیقاتی با شماره قرارداد ۰۰/۴۳۰۴ با بخش تحقیقات و فناوری شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر است. بدین‌گونه از آقای رحیم ستوه‌بحرینی مدیر تحقیقات و فناوری شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیاس‌گزاری می‌شود.

ضخیم‌شدن پوسته زیرین روی ماگماتیسم در حال صعود اثرگذار بوده است.

۵- از دیدگاه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و باروری ماگماتیسم، کانسار کوه‌کپوت به کانسارهای نوع کوه‌پنج‌بیش از نوع جبال‌بارز شباهت دارد و سرشت کالک‌آلکان ناشی از کمان بالغ نشان می‌دهد و با توجه به سرشت آن، در دسته ذخایر نیمه‌اقتصادی تا اقتصادی جای می‌گیرد.

۶- تکتونوماگماتیسم منطقه بر پایه بررسی عنصرهای

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148(5-6), 692-725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z., and Vogt, K. (2011) Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: the Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine*, 148(5-6), 980-1008. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000380>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., and 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. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Ajalli, N., Torkian, A., and Tale Fazel, E. (2021) Geochemistry of basaltic rocks of Meshkin- Rasht Abad area (North of Zanjan). *Petrological Journal*, 45, 1-18 (in Persian). <http://doi.org/10.22108/ijp.2020.120869.1158>
- Alavi, M. (2007) Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9), 1064-1095. <http://doi.org/10.2475/09.2007.02>
- Alavi, S.G., Hosseinzadeh, M.R., and Moayyed, M. (2014) Petrography and petrology of the Sungun porphyry copper deposit and post mineralization dykes with a view to Skarn mineralization (north of Varzeghan, East Azarbaijan). *Petrological Journal*, 5(17), 2228-5210.
- Aldanmaz, E.R.C.A.N., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F., and Mitchell, J.G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(1-2), 67-95. [http://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00182-7](http://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00182-7)
- Alirezaei, A., Arvin, M., and Dargahi, S. (2017) Adakite-like signature of porphyry granitoid stocks in the Meiduk and Parkam porphyry copper deposits, NE of Shahr-e-Babak, Kerman, Iran: Constrains on geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 88, 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.023>
- Arjmandzadeh, R., and Santos, J.F. (2014) Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 123-140. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0959-4>
- Arvin, M., Pan, Y., Dargahi, S., Malekizadeh, A., and Babaei, A. (2007) Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock southwest of Kerman, Iran: Implications for initiation of Neotethys subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3-4), 474-489. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.01.001>
- Asadi, S. (2018) Triggers for the generation of post-collisional porphyry Cu systems in the Kerman magmatic copper belt, Iran: New constraints from elemental and isotopic (Sr-Nd-Hf-O) data.

- Gondwana Research, 64, 97-121. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>
- Asadi, S., Moore, F., and Zarasvandi, A. (2014) Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth-Science Reviews*, 138, 25-46. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>
- Asran, M., Ezzat, M., and Rahman, A. (2012) The Pan-African calc-alkaline granitoids and the associated mafic microgranular enclaves (MME) around Wadi Abu Zawal area, North Eastern desert, Egypt: geology, geochemistry and petrogenesis. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 2(1), 1-16.
- Bao, X.S., Yang, L. Q., Gao, X., Groves, D., He, W.Y., and Li, M.M. (2020) Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu–Au–Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 116, 103258. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103258>
- Barber, N.D., Edmonds, M., Jenner, F., Audéat, A., and Williams, H. (2021) Amphibole control on copper systematics in arcs: Insights from the analysis of global datasets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 307, 192-211. <http://doi.org/10.31223/X5NK52>
- Blundy, J and Cashman, K. (2001) Ascent-driven crystallization of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140, 631-650. <http://doi.org/10.1007/s004100000219>
- Blundy, J., and Cashman, K. (2005) Rapid decompression-driven crystallization recorded by melt inclusions from Mount St. Helens volcano. *Geology*, 33(10), 793-796. <https://doi.org/10.1130/G21668.1>
- Boynton, W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In *Developments in geochemistry* (Vol. 2, pp. 63-114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Brown, G. C., Thorpe, R. S., and Webb, P. C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society*, 141(3), 413-426. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0413>
- Cai, Y., Ni, P., Wang, G., and Chen, H. (2023) Geochemical Characteristics of the Granodiorite Porphyry in Dongxiang W-Cu Deposit, SE China. *Minerals*, 13(3), 380. <https://doi.org/10.3390/min13030380>
- Chappell, B.W., and White, A. J. (2001) Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian journal of earth sciences*, 48(4), 489-499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Cooke, D.R., Hollings, P and Walshe, J. L. (2005) Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5), 801-818. <http://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>
- Dargahi, S., Arvin, M., Pan, Y., and Babaei, A. (2010) Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh–Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: constraints on the Arabian–Eurasian continental collision. *Lithos*, 115(1-4), 190-204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.002>
- Defant, M.J., and Drummond, M.S. (1993) Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21(6), 547-550. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021%3C0547:MSHPEO%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021%3C0547:MSHPEO%3E2.3.CO;2)
- Delavari, M., and Damghani, A. (2022) Geochemical variations of the Eocene volcanic rocks from Kahak area (south of Qom): Evidence for different conditions of mantle melting in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. *Petrological Journal*, 13(2), 91-120. <https://doi.org/10.22108/ijp.2022.132106.1261>
- Dimitrijevic, M.D. (1973) *Geology of Kerman Region*. Geology Survey of Iran, Report No. 52, 334 p.
- Dong, C., Liu, D., Li, J., Wang, Y., Zhou, H., Li, C., and Xie, L. (2007) Palaeoproterozoic Khondalite

- Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area. *Chinese Science Bulletin*, 52, 2984-2994. <http://doi.org/10.1007/s11434-007-0404-9>
- Febbo, G.E., Kennedy, L.A., Savell, M., Creaser, R.A., and Friedman, R.M. (2014) Geology of the Mitchell Au-Cu-Ag-Mo porphyry deposit, northwestern British Columbia, Canada. *Geological Fieldwork*, (2015-1), 59-86. <http://doi.org/10.5382/econgeo.2019.4632>
- Fitton, J. G., James, D and Leeman, W. P. (1991) Basic magmatism associated with late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variations in space and time. *Journal of geophysical Research: Solid earth*, 96(B8), 13693-13711. <http://doi.org/10.1029/91JB00372>
- Goudarzi, M., Zamanian, H., and Klötzli, U. (2024) Geochemistry, petrography and tectono-magmatic setting of Eocene volcanic lavas in the south of Mamoniye, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Markazi Province, Iran. *Petrological Journal*, 15(1). <http://doi.org/10.22108/ijp.2024.139861.1315>
- Green, N.L. (2006) Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from the Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos*, 87(1-2), 23-49. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.05.003>
- Green, T.H. (1994) Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis—Sedona 16 years later. *Chemical Geology*, 117(1-4), 1-36. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90119-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90119-8)
- Hao, H., Campbell, I.H and Park, J.W. (2024) Critical differences between typical arc magmas and giant porphyry Cu±Au systems: Implications for exploration. *Journal of Petrology*, ega058. <http://doi.org/10.1093/petrology/egae058>
- Haschke, M., Siebel, W., Günther, A., Scheuber, E. (2002) Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile (21–26_S). *Journal of Geophysical Research*, 107, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2001JB000328>
- Hassanzadeh, J. (1993) Metallogenic and Tectonomagmatic Events in the SE Sector of the Cenozoic Active Continental Margin of Central Iran, 204 p. Unpublished Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F. (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram. *Journal of petrology*, 48(12), 2341-2357. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- He, W.Y., Mo, X.X., Yu, X.H., Dong, G.C., He, Z.H., Huang, X.F., Li, X.W., Jiang, L.L. (2014) Genesis and geodynamic settings of lamprophyres from Beiya, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr–Nd–Pb–Hf Isotopes. *Acta Petrol. Sin.*, 30 (11), 3287–3300 (in Chinese with English abstract).
- Hill, I.G., Worden, R.H., and Meighan, I.G. (2000) Yttrium: the immobility-mobility transition during basaltic weathering. *Geology*, 28(10), 923-926. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<923:YTITDB>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<923:YTITDB>2.0.CO;2)
- Hou, Z., Zhang, H., Pan, X., and Yang, Z. (2011) Porphyry Cu (–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2), 21-45. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.002>
- Huang, M.L., Bi, X.W., Hu, R.Z., Chiaradia, M., Zhu, J.J., Xu, L.L and Yang, Z.Y. (2024) Linking Porphyry Cu Formation to Tectonic Change in Postsubduction Settings: A Case Study from the Giant Yulong Belt, Eastern Tibet. *Economic Geology*, 119(2), 279-304. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5052>
- Ionov, D.A., and Hofmann, A.W. (1995) Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters*, 131(3-4), 341-356. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00037-D](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00037-D)

- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A., and Mehrabi, B. (2010) Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar–Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, 52(4-6), 608-630. <http://doi.org/10.1080/00206810903416323>
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Ling, H.F., and Dai, B.Z. (2006) Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4), 617-633. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.023>
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H and Vikre, P.G. (2010) Porphyry copper deposit model. Chapter B of Mineral deposit models for resource assessment: US Geological Survey Scientific Investigations Report, 169.
- Kamali, A.A., Moayyed, M., Amel, N., Hosseinzadeh, M.R., Mohammadiha, K., Santos, J.F., and Brenna, M. (2018) Post-mineralization, cogenetic magmatism at the Sungun Cu-Mo porphyry deposit (Northwest Iran): Protracted melting and extraction in an arc system. *Minerals*, 8(12), 588. <https://doi.org/10.3390/min8120588>
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K., and Greene, A.R. (2003) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on geochemistry*, 3, 659. <http://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03035-8>
- Khademian, F., Alaminia, Z., Ghasemi, A and Nadimi, A. (2022) Petrology, trace and rare earth elements geochemistry, and tectonic setting of basic-intermediate volcanic rocks from northwest of Nain, Isfahan. *Petrological Journal*, 13(4), 1-34. <https://doi.org/10.22108/ijp.2023.134625.1285>
- Khosravi, M., Rajabzadeh, M.A., Qin, K., and Asadi, H.H. (2019) Tectonic setting and mineralization potential of the Zefreh porphyry Cu-Mo deposit, central Iran: Constraints from petrographic and geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, 199, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.01.001>
- Kusha Madan Consulting Engineers. (2019) Carrying out prospecting, general exploration, and monitoring operations in the northern and southern areas of the Bam area, 337 p.
- Lee, C.T.A., and Tang, M. (2020) How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 529. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115868>
- Loucks, R.R. (2014) Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(1), 5-16. <https://doi.org/10.1080/08120099.2013.865676>
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Abdollahy Riseh, M., and Sepahi, A.A. (2020) Petrology and tectonic settings of the Sarcheshmeh porphyry copper deposit with emphasis on granodiorite and quartz eye porphyry. *Journal of Economic Geology*, 12(3), 269-297. <https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.80951>
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3), 411-429. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- McDonough W.F. and Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- McInnes, B.I., Evans, N.J., Fu, F.Q., and Garwin, S. (2005) Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1), 467-498. <http://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.18>
- McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Belousova, E., Griffin, W.T., and Andrew, R.L. (2003) Timing of mineralization and exhumation processes at the Sar Cheshmeh and Meiduk porphyry Cu deposits, Kerman belt, Iran. In *Mineral Exploration and Sustainable Development (7th Biennial SGA Meeting, Athens (August 24–28). Millpress, Rotterdam (pp. 1197-1200).*
- Mengel, K., and Green, D.H. (1989) Stability of amphibole and phlogopite in metasomatized peridotite under water-saturated and water-under-saturated conditions. In: *Kimberlites and related rocks.*

- Geological Society of Australia Special Publication 14, 571–581.
- Mirzababaei, G., Shahabpour, J., Zarasvandi, A., and Hayatolgheyb, S.M. (2016) Structural controls on Cu metallogenesis in the dehaj area, kerman porphyry copper belt, Iran: a remote sensing perspective. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 27(3), 253-267. <https://doi.org/10.22059/JSCIENCES.2016.57657>
- Mohammaddoost, H., Ghaderi, M., Kumar, T.V., Hassanzadeh, J., Alirezaei, S., and Babu, E.V.S.S.K. (2023) Geology, mineralization, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of Serenu porphyry copper prospect, Kerman Cenozoic magmatic arc, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 105540. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105540>
- Najmi, F., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Karimpour, M.H. (2023) Geology, mineralization, and geochemistry of ore and intrusive rocks in the North of Bahariyeh area, East of Kashmar, NE Iran. *Petrological Journal*, 14(1), 109-138. <http://doi.org/10.22108/ijp.2022.132381.1266>
- Nelson, S.T and Montana, A. (1992) Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, 77(11-12), 1242-1249.
- Nicholson, K.N., Black, P.M., Hoskin, P.W.O., and Smith, I.E.M. (2004) Silicic volcanism and back-arc extension related to migration of the Late Cainozoic Australian–Pacific plate boundary. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131(3-4), 295-306. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00382-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00382-2)
- Panter, K.S., Hart, S.R., Kyle, P., Blusztajn, J., and Wilch, T. (2000) Geochemistry of Late Cenozoic basalts from the Crary Mountains: characterization of mantle sources in Marie Byrd Land, Antarctica. *Chemical Geology*, 165, 215–241. [http://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00171-0](http://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00171-0)
- Park, J.W., Campbell, I.H., Chiaradia, M., Hao, H., and Lee, C.T. (2021) Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2(8), 542-557. <http://doi.org/10.1038/s43017-021-00182-8>
- Pearce, J.A and Peate, D.W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1), 251-285. <http://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Pearce, J.A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Continental basalts and mantle xenoliths*, 230-249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B., and Tindle, A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Perelló, J., Raziq, A., and Schloderer, J. (2008) The Chagai porphyry copper belt, Baluchistan province, Pakistan. *Economic Geology*, 103(8), 1583-1612. <http://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.8.1583>
- Ramezani, T., Maanijou, M., Asadi, S., Lentz, D., and Pirouznia, N. (2019) Comparison of mineralization of the Sungun and Kighal porphyry copper deposits, NW Iran: with an emphasis on fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, 10(2), 403-424. <https://doi.org/10.22067/econg.v10i2.61340>
- Richards, J. P., Boyce, A.J., and Pringle, M.S. (2001) Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96(2), 271-305. <http://doi.org/10.2113/96.2.271>
- Richards, J.P and Kerrich, R. (2007) Special paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4), 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Richards, J.P. (2003) Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8), 1515-1533. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.8.1515>
- Richards, J.P. (2011) Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore*

- Geology Reviews, 40(1), 1-26. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Richards, J.P. (2013) Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, 6(11), 911-916. <http://doi.org/10.1038/ngeo1920>
- Richards, J.P. (2015) Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70, 323-345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., and Fletcher, T. (2012) High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2), 295-332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>
- Rollinson, H.R. (1993) Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, Wiley, New York, 352. <http://doi.org/10.4236/ijg.2016.712101>
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J and Barton, M.D. (2005) Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds), One Hundredth Anniversary Volume, Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.10>
- Shafiei, B., Haschke, M., and Shahabpour, J. (2009) Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44, 265-283. <http://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shahabpour, J. (1982) Aspects of Alteration and Mineralization at the Sar-Cheshmeh Copper-Molybdenum Deposit, Kerman, Iran, 342 p. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Leeds, Leeds.
- Shen, P., Pan, H., and Seitmuratova, E. (2017) Petrogenesis of the mineralized granitoids from the Kounrad and Borly porphyry Cu deposits and the East Kounrad porphyry Mo deposit in Kazakhstan: Implication for tectonic evolution and mineralization of the western part of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 286, 53-74. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.06.006>
- Sillitoe, R.H. (1997) Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 373-388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: A review. *AAPG bulletin*, 52(7), 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Sun, S.S., and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Journal of the Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345. <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun, W., Huang, R.F., Li, H., Hu, Y.B., Zhang, C.C., Sun, S.J., and Ling, M.X. (2015) Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65, 97-131. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004>
- Sun, Y.G., Zhao, Z.H., Sun, F.Y., Ding, Q.F., Chen, X.S., Li, J.B., and Li, Y.J. (2022) Age and petrogenesis of late Mesozoic intrusions in the Huoluotai porphyry Cu-(Mo) deposit, northeast China: Implications for regional tectonic evolution. *Geoscience Frontiers*, 13(2), 101344. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101344>
- Svetlitskaya, T.V., and Nevolko, P.A. (2022) New whole-rock skarn and porphyry fertility indicators: Insights from Cu-Au-Fe skarn and Cu-Mo-Au porphyry deposits in Eastern Transbaikalia, Russia. *Ore Geology Reviews*, 149, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105108>
- Tang, M., Lee, C.T.A., Costin, G., and Höfer, H.E. (2019) Recycling reduced iron at the base of magmatic orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 528, 115827. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115827>
- Tang, M., Lee, C.T.A., Ji, W.Q., Wang, R., and Costin, G. (2020) Crustal thickening and endogenic

- oxidation of magmatic sulfur. *Science Advances*, 6(31), eaba6342. [http://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90049-1](http://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90049-1)
- Tatsumi, Y., Hamilton, D.L., and Nesbitt, R. W. (1986) Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1-4), 293-309. [http://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90049-1](http://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90049-1)
- Temel, A., Gündoğdu, M.N., and Gourgaud, A. (1998) Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 327-354. [http://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00062-6](http://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00062-6)
- Thirlwall, M.F., Smith, T.E., Graham, A.M., Theodorou, N., Hollings, P., Davidson, J.P., and Arculus, R.J. (1994) High field strength element anomalies in arc lavas: source or process? *Journal of petrology*, 35(3), 819-838. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.3.819>
- Tosdal, R.M., and Richards, J.P. (2001) Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Structural Controls on Ore Genesis, Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/Rev.14.06>
- Tsuchiyama, A. (1985) Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/BF01177585>
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., and Guest, B. (2011) A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, 30(3). <https://doi.org/10.1029/2010TC002809>
- Wang, Y., Chen, H., Han, J., Chen, S., Huang, B., Li, C., and Chen, M. (2018) Paleozoic tectonic evolution of the Dananhu-Tousuquan island arc belt, Eastern Tianshan: Constraints from the magmatism of the Yuhai porphyry Cu deposit, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153, 282-306. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.022>
- Whitney, D.L and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185-187. <http://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Woodhead, J., Eggins, S., and Gamble, J. (1993) High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4), 491-504. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)2893-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)2893-2)
- Wyborn, L.A.I., Heinrich, C.A., and Jaques, A.L. (1994) Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In *The AusIMM Annual Conference*, p. 109-115. AusIMM Darwin.
- Yang, Q., Ren, Y.S., Chen, S.B., Zhang, G.L., Zeng, Q.H., Hao, Y.J., and Sun, Z.M. (2019) Geological, geochronological, and geochemical insights into the formation of the Giant Pulang porphyry Cu (–Mo–Au) deposit in northwestern Yunnan Province, SW China. *Minerals*, 9(3), 191. <https://doi.org/10.3390/min9030191>
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, K., and Porter, T.M. (2005) Porphyry copper deposits of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Super porphyry copper and gold deposits: A global Perspective*, 2, 441-452.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S., and Lentz, D. (2019) Hydrothermal fluid evolution in collisional Miocene porphyry copper deposits in Iran: Insights into factors controlling metal fertility. *Ore Geology Reviews*, 105, 183-200. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.027>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Pourkaseb, H., Asadi, S., Saed, M., and Lentz, D.R. (2018) Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfides of mineralized porphyry copper systems, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 223,

36-59. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2017.11.012>

- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M., and Pourkaseb, H. (2015) Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70, 407-423. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.010>
- Zarasvandi, A., Taheri, M., Rezaei, M., and Raith, J. (2022) Investigation of the behavior of rare earth elements and trace elements in Sarkuh porphyry copper deposit, Kerman, Iran. *Advanced Applied Geology*, 11(4), 690-709. <https://doi.org/10.22055/aag.2021.35086.2166>
- Zhao, J.H., and Zhou, M.F. (2007) Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152(1-2), 27-47. <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.09.002>
- Zheng, H., Huang, Q. T., Kapsiotis, A., Xia, B., Yin, Z. X., Zhong, Y., and Shi, X. L. (2017) Early Cretaceous ophiolites of the Yarlung Zangbo suture zone: Insights from dolerites and peridotites from the Baer upper mantle suite, SW Tibet (China). *International Geology Review*, 59(11), 1471-1489. <http://doi.org/10.1080/00206814.2016.1276867>