Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Winter 2026, Vol. 15 (4): 1 - 19

Research Article

Petrogenesis and tectonic setting of andesites from the Bam area (Kerman province) using biotite chemistry

Mirmohammad Miri[1]*, Alireza Zarasvandi[1], Nader Taghipour[2], Arash Bapirzadeh[1]

1-Geology Department, Faculty f Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2-Geology Department, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran

Keywords: *Biotite, Andesite, Calc-alkaline, Ore mineralization, Porphyry Cu, Bam*

1-Introduction

Silicate minerals, the most abundant constituents of Earth's crust and mantle, retain valuable records of magmatic processes. Their chemical compositions, meticulously preserved during crystallization, serve as robust proxies for decoding the complex evolution of magmas, from their genesis in the mantle to their emplacement and final differentiation within the crust. Variations in the concentrations of major and trace elements in silicate phases (e.g., olivine, pyroxene, plagioclase, biotite, and quartz) are highly sensitive to changes in melt composition, temperature, pressure, and oxygen fugacity. These variations impose critical constraints on the physicochemical conditions that govern magma differentiation.

Among ferromagnesian silicates, biotite is a particularly important phase in unraveling the linkage between magma evolution and metallogenesis. The elemental composition of biotite, especially in terms of Fe, Mg, Al, Ti, F, and Cl, is strongly influenced by the volatile content and oxidation state of the hosting magma. Concurrently, biotite preserves essential information about the petrogenetic history and tectonic setting of its host rocks. Hence, the geochemical analysis of biotite can aid in distinguishing between fertile and barren intrusive bodies, as well as in evaluating the role of hydrothermal fluids in the formation of ores.

The Bam region, located in southeastern Iran (Fig. 1), lies within the Cenozoic Kerman magmatic copper belt (KMCB) and has been the subject of numerous mineral exploration efforts. North of the area, a suite of volcanic and subvolcanic rocks occurs, which are considered prospective for porphyry copper mineralization. In this context, the geochemical composition of biotite from volcanic rocks has been investigated to assess the mineralization potential of their parental magmas. Given the genetic association between these volcanic rocks and subvolcanic intrusions responsible for copper mineralization, the outcomes of this study can provide valuable guidance for future exploration efforts in the region.

2-Regional Geology

The Bam area is situated in the southern part of the Urumieh-Dokhtar magmatic zone (Fig. 1), a key metallogenic zone within the broader Zagros orogenic system. This magmatic belt resulted from the opening of the Neotethys Ocean during the Late Paleozoic, the subduction of the Neotethyan lithosphere beneath the Iranian microplate during the Mesozoic, and the subsequent collision between the Afro-Arabian and Iranian plates in the Tertiary (Stöcklin, 1968; Alavi, 1994; Hassanzadeh & Wernicke, 2016). The Urumieh-Dokhtar arc is characterized by subduction-related calc-alkaline magmatism spanning from the Eocene to the Quaternary, with its magmatic climax occurring during the Middle Eocene. This belt hosts most of Iran's known porphyry Cu ± Mo deposits, especially in the KMCB.

* Corresponding author: miri.mirmohammad@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2025.49754.2517
Received: 2025-04-21
Accepted: 2025-06-21

The Bam region, in the northern KMCB, comprises volcanic rocks, ash-flow tuffs, volcaniclastic, and sedimentary strata (Fig. 1b). The oldest lithologies in the area include gray Cretaceous and Paleocene limestones, which are overlain by Tertiary volcanic sequences. The Eocene volcanic succession forms the main topographic features. It is stratigraphically divided into (1) a lower unit composed of well-bedded pyroclastic sediments—conglomerates, volcanic breccias, sandstones, and siltstones interlayered with dacitic lavas and ash flows, and (2) a middle unit characterized by alternating flows and pyroclastic layers of dacite, rhyolite, and andesite. Exploration drill cores from the area reveal granitoid subvolcanic bodies at depth (Miri et al., 2024). Hydrothermal alteration zones, including potassic, phyllic, argillic, and propylitic assemblages, are widely developed, indicative of a porphyry-style copper mineralization system.

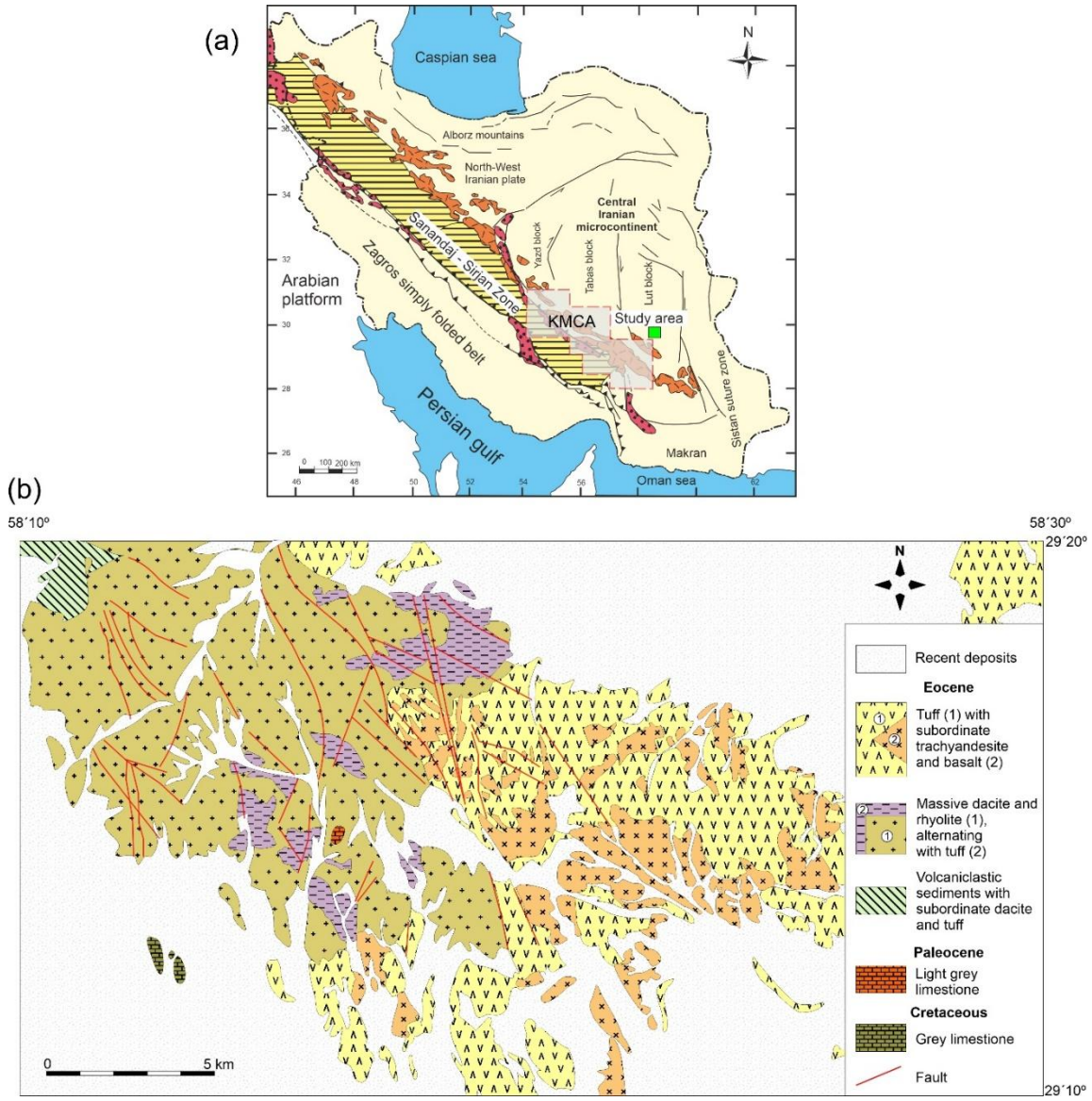


Fig. 1. (a) Geology map of Iran (Ghasemi & Talbot, 2006) and the location of the Kerman magmatic copper belt (KMCB), and (b) Geology map of the Bam area (Aghanabati et al., 1993).

3-Methods

A total of 50 representative samples of volcanic rocks were collected during detailed fieldwork. The thin sections were studied using a polarizing microscope. Four andesite samples containing well-preserved biotite phenocrysts suitable for the objectives of the study were selected. The chemical composition of biotite was determined using electron probe microanalysis (EPMA) at the University of Leoben, Austria. Analyses were performed using a JEOL JXA 8200 electron microprobe, operated at an accelerating voltage of 15 kV, a beam current of 10 nA, and counting times ranging from 20 to 100 seconds, depending on the element being analyzed.

4-Petrography

The analyzed andesitic rocks exhibit a range of volcanic textures, including glomeroporphyritic, sieve, microlitic porphyritic, and vesicular fabrics. The main mineral constituents are plagioclase (50–60 vol%), biotite (20–30 vol%), and hornblende (10–15 vol%). Magnetite and pyrite are the main accessory phases, whereas sericite and chlorite occur as secondary alteration products. Plagioclase dominates the modal mineralogy, occurring both as phenocrysts and microlites in the groundmass. The phenocrysts frequently display sieve textures, well-developed chemical zoning, and corroded and embayed rims. Biotite is the principal ferromagnesian mineral in these samples, appearing as subhedral to anhedral grains ranging in size from 0.2 to 1 mm, typically distributed within the groundmass. Larger biotite grains often host inclusions of opaque phases. Some biotite crystals show partial chloritization. Hornblende is the second most abundant ferromagnesian mineral and occurs as subhedral to anhedral crystals, with colors ranging from green to brown.

5-Results

5-1-Biotite Chemistry

The chemical compositions of biotite crystals are presented in Table 1. The structural formulae were calculated based on 11 oxygen atoms using the method proposed by Li et al. (2020). To classify the biotite compositions, diagrams of octahedral aluminum (Al^{VI}) versus Fe/(Fe + Mg) (Rieder et al., 1999) and the ternary diagram ($Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti$) – ($Fe^{2+} + Mn$) – Mg (Foster et al., 1960) were employed (Fig. 2). The volcanic biotites exhibit high Mg contents, ranging from 1.7 to 2 atoms per formula unit (apfu), and plot in the high-Mg biotite field on both diagrams. The ternary FeO + MnO – 10×TiO_2 – MgO diagram (Nachit et al., 2005) was utilized to distinguish between primary (magmatic) biotite, re-equilibrated primary biotite, and secondary biotite. According to this diagram, the analyzed biotites exhibit moderate TiO_2 enrichment and plot predominantly in the field of re-equilibrated biotite (Fig. 2).

6-Magmatic Series and Tectonic Setting

Because the composition of biotite is closely tied to the chemical and physicochemical characteristics of the parental magma (Abdel-Rahman, 1994), it serves as a useful indicator of the tectonomagmatic setting of volcanic rocks. The concentrations of Al_2O_3, MgO, and FeO in biotite are particularly diagnostic of magmatic series and tectonic environments. These parameters were evaluated using classification diagrams shown in Fig. 3. Based on these diagrams, the biotites fall within the compositional fields associated with alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. Although originally developed for granitic biotites, these diagrams have also been applied to mafic to intermediate compositions in several recent studies (e.g., Faridazad and Ashrafi, 2025). The majority of the analyzed biotite samples plot within the calc-alkaline field, consistent with formation in a subduction-related magmatic arc setting.

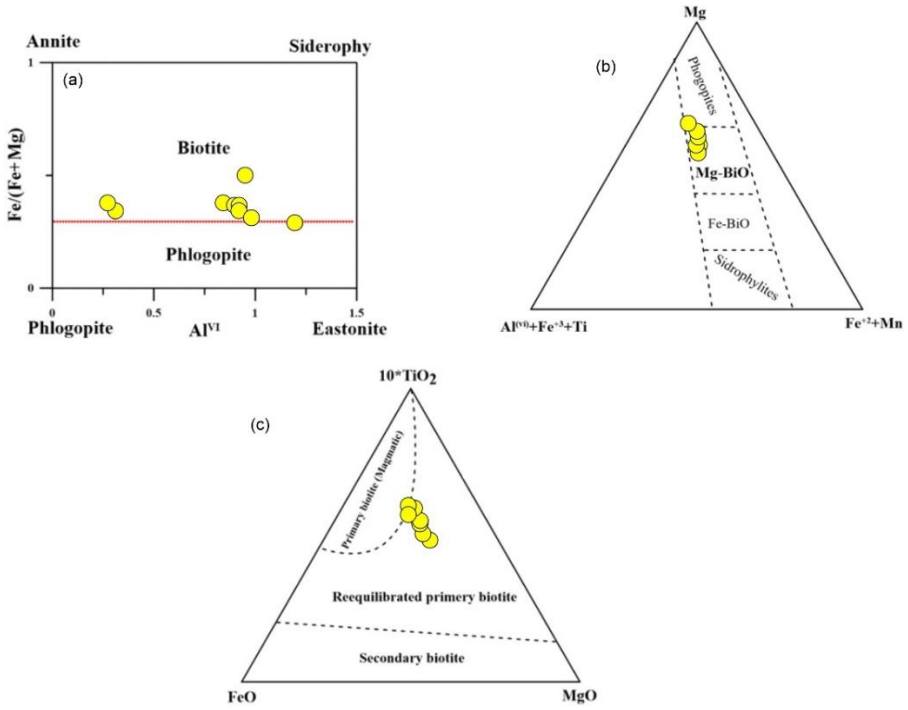


Fig. 2. Chemical classification of the biotites from the north Bam volcanic rocks. (a) Al^{VI} vs. Fe/(Fe+Mg) diagram (Rieder et al., 1999), (b) (Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti) - (Fe^{2+}+Mn) – Mg ternary diagram (Foster et al., 1960), and (c) 10×TiO_2 - FeO+MnO – MgO ternary diagram (Nachit et al., 2005).

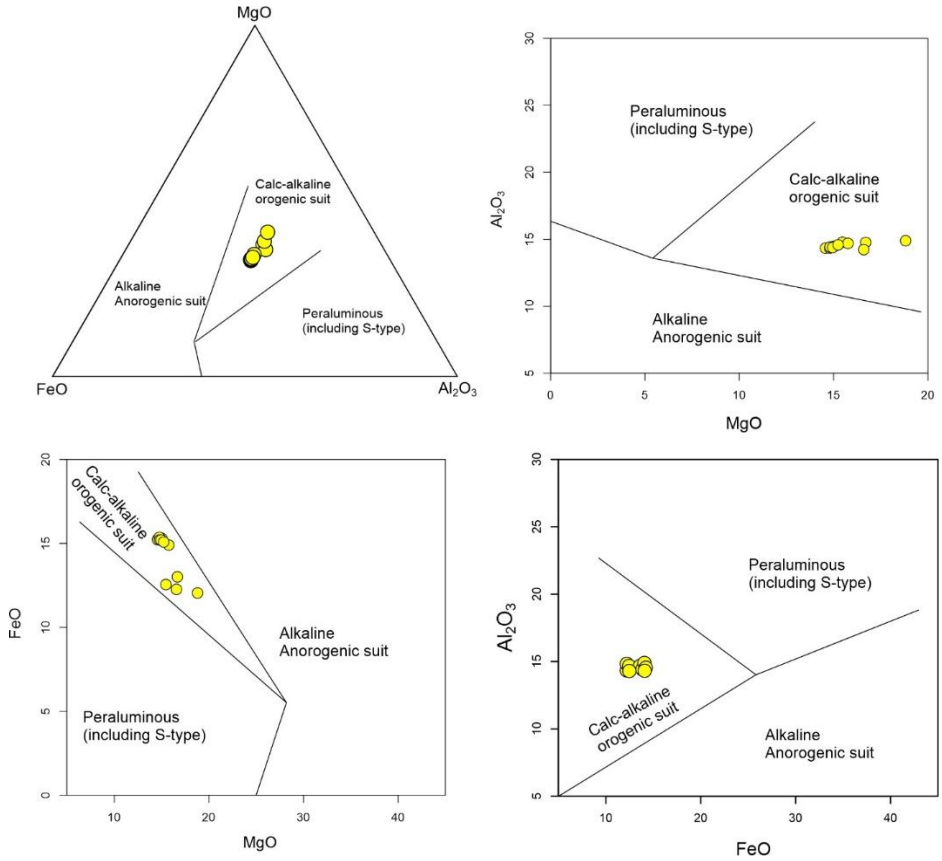


Fig. 3. Diagrams discriminating tectonic setting and magma series of the parent magmas based on the biotite compositions (Abdel-Rahman, 1994).

7-Mineralization Potential

Volcanic rocks are genetically linked to their plutonic counterparts—stocks and batholiths—which originate from a common parental magma but crystallize at different crustal levels. Stocks typically solidify at shallow to intermediate depths, while lavas erupt and crystallize at the surface. Therefore, the geochemical features of accessible volcanic rocks may serve as proxies for the characteristics of concealed intrusive bodies at depth. Given the occurrence of porphyry copper mineralization in the region and the genetic relationship between the volcanic and subvolcanic intrusive rocks (Miri et al., 2024), the chemical composition of biotite in the andesitic lavas was evaluated as an indicator of magmatic fertility.

To assess the potential relationship between the biotite chemistry and porphyry copper fertility, the analyzed biotites were compared with those from mineralized and barren granitoid intrusions (Fig. 4). This comparison utilized indices such as the magnesium number (Mg# = Mg/Mg + Fe^{2+}), Ti content, and Al^{VI} (Taghavi et al., 2022). In all classification plots, the studied biotites fall within the compositional field of biotite from mineralized granitoid systems.

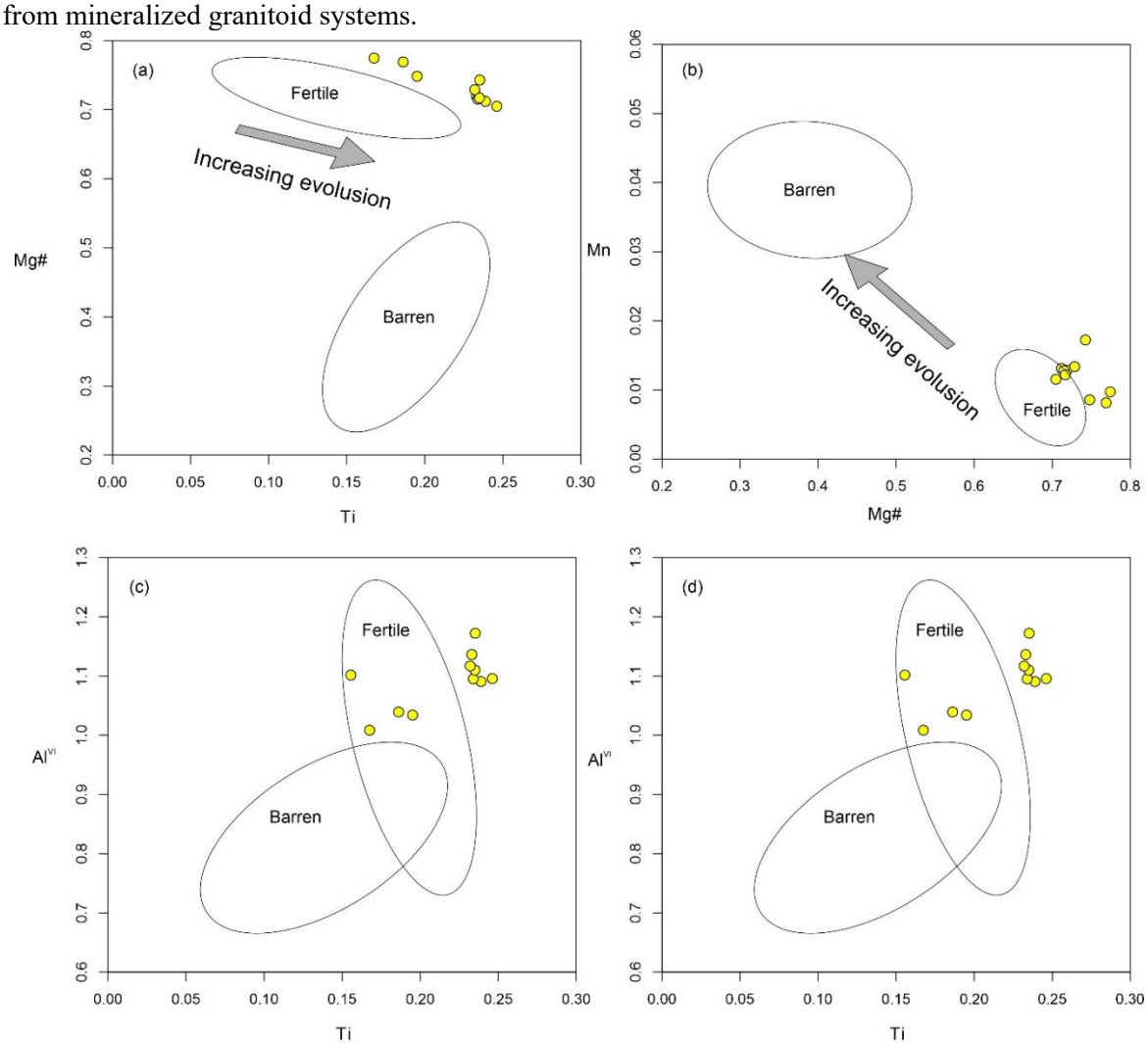


Fig. 4. Comparison of the andesite biotites with those of barren and productive granitoid bodies (Taghavi et al., 2022)

In addition to compositional trends indicative of magmatic fertility, biotite can also serve as a proxy for magmatic redox conditions. The ternary Fe^{3+}–Fe^{2+}–Mg diagram (Wonse & Eugster, 1965) was employed to estimate the oxygen fugacity of the magma based on biotite chemistry (Fig. 5). In this diagram, the studied biotites plot within the Ni–NiO buffer range and overlap with the field of biotite from fertile granitoid intrusions.

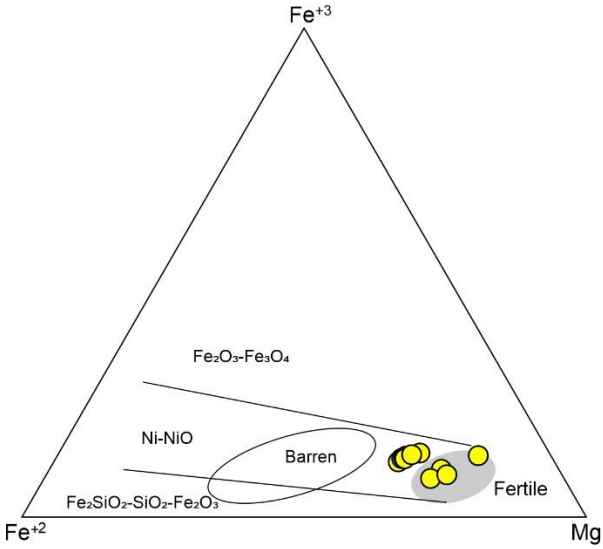


Fig. 5. Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg diagram to determine oxygen fugacity of the biotite parent magma (Wones and Eugster, 1965)

8-Conclusion

The andesitic rocks of the northern Bam region host biotite crystals characterized by high magnesium contents, classifying them as Mg-rich biotites. These biotites predominantly exhibit re-equilibrated compositions, indicative of post-crystallization alteration and interaction with hydrothermal fluids. The parental magma of these biotites is calc-alkaline in nature and formed within a subduction-related tectonic setting. The geochemical characteristics of the biotites, particularly their position within the Ni–NiO buffer field, reflect the redox conditions prevailing during the hydrothermal alteration processes. The compositional similarity between the studied biotites and those from known fertile granitoid intrusions suggests a shared magmatic lineage. Given the genetic connection commonly observed between volcanic rocks and their subvolcanic equivalents, these findings strongly imply that the granodioritic intrusions in the region are also prospective for porphyry copper mineralization. This study underscores the utility of biotite geochemistry as a reliable tool in assessing the mineralization potential of volcanic terranes. The consistency of the present results with prior regional geochemical investigations supports the application of this approach in guiding future porphyry copper exploration efforts in the northern segment of the KMCB.

References

Abdel-Rahman, A.-F.M., 1994. Nature of Biotites from Alkaline, Calc-alkaline, and Peraluminous Magmas. Journal of Petrology 35, 525–541. https://10.1093/petrology/35.2.525

Aghanabati, A., Eftekharnejad, J., Samimi, M., Arshadi, S., 1993. Geology Map of the Bam area, Scale 1:100,000. In. Tehran: Geology Survey of Iran.

Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229, 211-238. https://https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2

Faridazad, M., Ashrafi, N., 2024. Petrology and petrogenesis of a tuff layer in the Upper Red Formation, north of Tabriz (NW Iran): shoshonitic magmatism with high Ba and Sr affinity. Petrological Journal 15, 69-96. https://10.22108/ijp.2024.141582.1333

Foster, M.D., 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. In.

Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). Journal of Asian Earth Sciences 26, 683–693.

Miri, M., Zarasvandi, A., Jalali, S.R., 2024. Geochemistry and Fertility Assessment of Sub-Volcanic Rocks from the Bam Area, North of the Kerman Magmatic Copper Belt, SE Iran. Geochemistry International 62, 300-313. https://10.1134/S0016702924030078

Nachit, H., Ibhi, A., Ohoud, M.B., 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites, and neoformed biotites. Comptes Rendus. Géoscience 337, 1415-1420.

Rieder, M., Cavazzini, G., 1998. D'yakonov, YS. Frank-Kamenetskii, VA, Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval, P. V., Müller, G., Neiva, AMR, Radoslovich, EW, Robert, J.-L., Sassi, FP, Takeda, H., Weiss, Z., and Wones, DR, 61-72.

Stöcklin, J., (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. AAPG Bulletin 52, 1229-1258.

Taghavi, A., Maanijou, M., Lentz, D.R., Sepahi-Gerow, A.A., Maruoka, T., Fujisaki, W., Suzuki, K., 2022. Biotite compositions and geochemistry of porphyry-related systems from the central Urumieh Dokhtar Magmatic Belt, western Yazd, Iran: Insights into mineralization potential. Lithos 412, 106593.

Wones, D., Eugster, H., (1965). Stability of Biotite: Experiment, Theory, and Application. American Mineralogist 50, 1228-1272.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Miri, M., Zarasvandi, A., Taghipour, N., Bapirzadeh, A,. 2026. Calc Petrogenesis and tectonic setting of andesites from the Bam area (Kerman province) using biotite chemistry. Adv. Appl. Geol. 15 (4), 1-19.
DOI: 10.22055/aag.2025.49754.2517
https://aag.scu.ac.ir/article_20215.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

مقاله پژوهشی

زایش و جایگاه زمین ساختی آندزیت‌های شمال منطقه بم (استان کرمان) با استفاده از شیمی بیوتیت

میرمحمد میری
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
علیرضا زراسوندی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
نادر تقی پور
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران
آرش باپیر زاده
کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
miri.mirmohammad@gmail.com
تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

چکیده
منطقه بم در شمال استان کرمان به عنوان بخشی از کمربند ماگمایی سنوزوئیک ایران میزبان فعالیت‌های ماگمایی مرتبط با کانه‌زایی مس می‌باشد. در طی این ماگماتیسم، سنگ‌های آتشفشانی آندزیت و تراکی بازالت و توده‌های نفوذی نیمه عمیق گرانیتوئیدی در منطقه جای‌گیر شده‌اند. کانی بیوتیت، به عنوان یک کانی سیلیکاته تیره می‌تواند اطلاعات خوبی در مورد ماهیت ماگمای مادر، جایگاه زمین‌ساختی و ارتباط آن با کانه‌زایی مس ارائه دهد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی بیوتیت‌های آندزیت‌های منطقه نشان می‌دهند که آنها از نوع غنی از منیزیم هستند و ترکیب شیمیایی آنها تحت تاثیر فرآیندهای پس از تشکیل دستخوش تغییر شده است. این بیوتیت‌ها از یک ماگمای مادر کالک‌آلکالن و در یک پهنه فرورانشی تشکیل شده‌اند. همچنین فوگاسیته اکسیژن رخداد آنها در شرایط نسبتا بالا و نیکل-نیکل‌اکساید بوده است. مقایسه ترکیب این بیوتیت‌ها با بیوتیت‌های توده‌های گرانتوئیدی مرتبط با کانه‌زایی مس پورفیری نشان دهنده شباهت آنهاست. با فرض هم‌زایش بودن آندزیت‌ها با گرانودیوریت‌های نیمه‌عمیق منطقه می‌توان نتیجه گرفت که توده‌های گرانودیوریتی دارای قابلیت باروری برای کانه‌زایی مس می‌باشند.

واژگان کلیدی: *بیوتیت، آندزیت، کالک‌آلکالن، کانه‌زایی، مس پورفیری، بم*

۱-مقدمه
کانی‌های سیلیکاته، فراوان‌ترین اجزای پوسته و گوشته زمین، اطلاعات ارزشمندی از فرآیندهای ماگمایی در خود ثبت می‌کنند. ترکیبات شیمیایی این کانی‌ها، که به دقت در طول تبلور ثبت شده‌اند، ابزاری مناسب را برای بررسی تکامل پیچیده ماگماها، از پیدایش آن‌ها در گوشته تا جایگیری و تفریق نهایی آن‌ها در پوسته، ارائه می‌دهند (برای مثال، Brod et al., 2001; Putirka, 2008). تغییرات غلظت عناصر اصلی و فرعی فازهای سیلیکات (مانند الیوین، پیروکسن، پلاژیوکلاز، بیوتیت و کوارتز) نسبت به تغییرات در ترکیب مذاب، دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن حساس هستند و محدودیت‌های مهمی را در مورد شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تفریق ماگما ارائه می‌دهند (برای مثال، Bindi et al., 1999; Ridolfi et al., 2010; Zaheri–Abdehvand et al., 2022; Cao, 2022).

تکامل سیستم‌های ماگمایی به طور ذاتی با تشکیل طیف وسیعی از کانسارهای فلزی مرتبط است (برای مثال، Pirajno, 2009 Sillitoe, 2010;) فرآیندهای بالا آمدن،

تبلور تفریقی، جذب، و خروج مواد فرار می‌توانند فلزات با اهمیت اقتصادی و عناصر مرتبط را در محیط‌های ماگمایی-گرمابی خاص متمرکز کنند. ترکیب شیمیایی کانی‌های سیلیکاته هم‌متبلور می‌تواند به عنوان شاخصی برای ترکیب در حال تحول مذابی که سیالات کانه‌زا از آن مشتق شده‌اند، عمل کند و همچنین بینشی در مورد شرایط حاکم بر محیط کانه‌زایی ارائه دهند (برای مثال، Halter et l., 2005; Kamali et al., 2020; Khosravi et al., 2021; Zarasvandi et al., 2019; Rezaei and Zarasvandi, 2022).

بیوتیت یکی از کانی‌های سیلیکات مهم در رمزگشایی ارتباط بین تکامل ماگما و کانه‌زایی فلزات دارد (مانند Selby and Nesbitt, 2000; Ayati et al., 2008; Li et al., 2020a; Zaheri–Abdehvand et al., 2022). محتوای عناصری مانند Fe، Mg، Al، Ti، F و Cl بیوتیت‌ها نسبت به محتوای مواد فرار و وضعیت اکسیداسیون ماگما حساس است و همزمان با آن تغییر می‌کند. از سوی دیگر، این کانی اطلاعات ارزشمندی در خصوص تاریخچه زایش و محیط زمین‌ساختی دیرینه سنگ‌های میزبان خود ارائه می‌نماید (مانند Abdel-Rahman, 1994). بنابراین، تجزیه و تحلیل شیمی بیوتیت می‌تواند به شناسایی توده‌های نفوذی بارور و غیربارور و نیز عملکرد سیالات گرمابی کانه‌زا کمک کند.

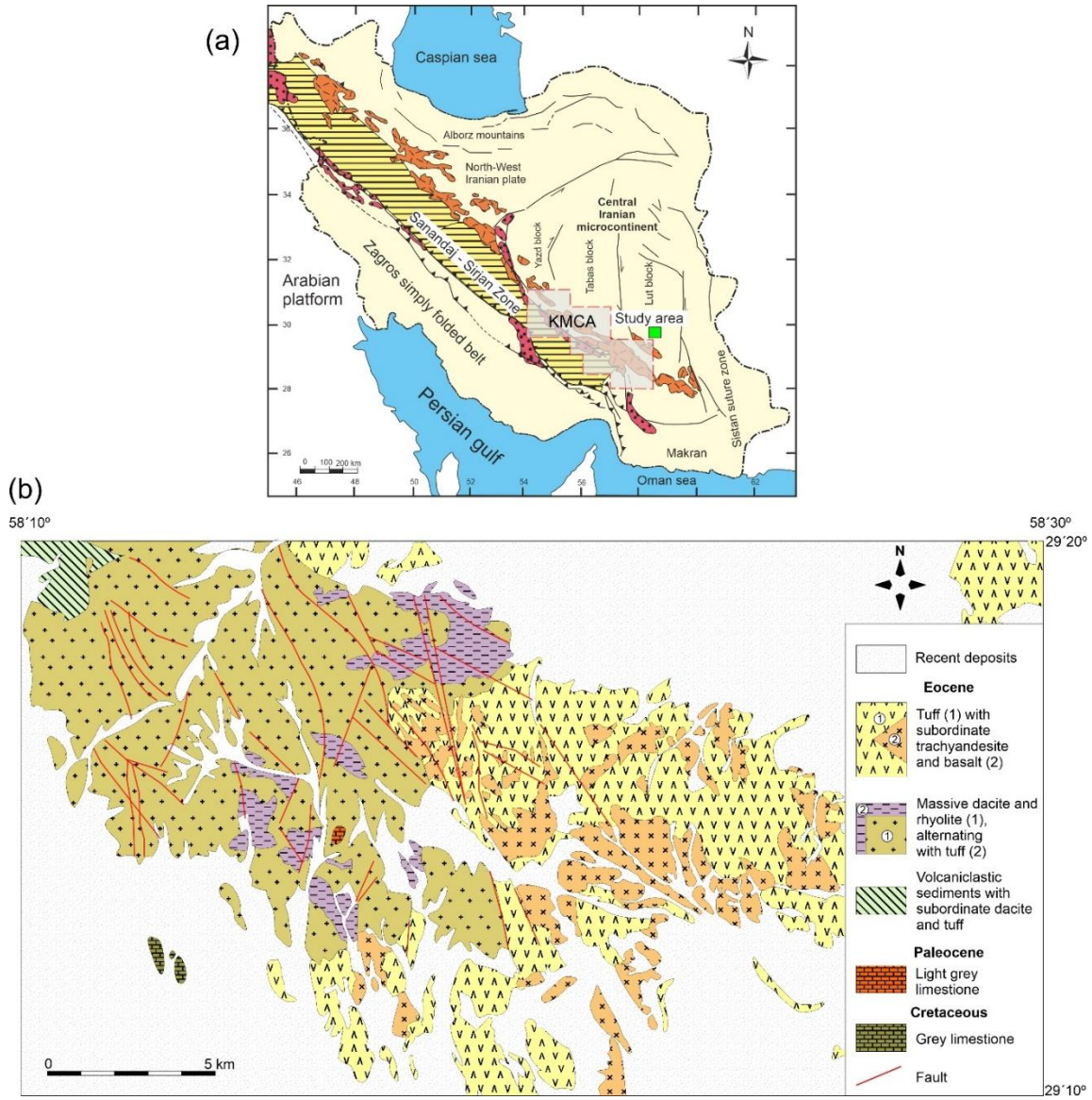
منطقه بم (شکل ۱) با توجه به قرار داشتن در کمربند مس پورفیری سنوزوئیک کرمان، در سال‌های گذشته مورد پی‌جویی‌های مرتبط با کانه‌زایی مس بوده است. در شمال منطقه بم، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌عمیق رخداد دارند که دارای توان کانه‌زایی مس پورفیری می‌باشند (Miri et al., 2024). در این پژوهش، ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های سنگ‌های آتشفشانی جهت تعیین توان کانه‌زایی ماگماهای سازنده آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه این سنگ‌های آتشفشانی با سنگ‌های نیمه‌عمیق مسئول کانه‌زایی ارتباط ژنتیکی دارند، نتایج این پژوهش می‌تواند در پی‌جویی‌های آینده در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

۲-زمین‌شناسی منطقه

بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (Stöcklin, 1968)، منطقه بم در بخش جنوبی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر قرار دارد (شکل ۱). پهنه ارومیه-دختر بخشی از پهنه کوهزایی و فلززایی زاگرس است که در اثر باز شدن اقیانوس نئوتتیس در پالئوزوئیک پسین، فرورانش لیتوسفر نئوتتیس به زیر صفحه خردقاره ایران مرکزی در مزوزوئیک و برخورد صفحه خرده قاره ایران مرکزی با صفحه آفریقایی-عربی در ترشیری تشکیل شده است (Mohajjel et al., 2003; Alavi, 2004; Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). این پهنه با سنگ‌های کالک‌آلکالن مرتبط با فرورانش از ائوسن تا کواترنری مشخص می‌شود، اگرچه در ائوسن میانی به اوج خود می‌رسد (Berberian and King, 1981; Ghasemi and Talbot, 2006). پهنه ارومیه-دختر میزبان بیشتر ذخایر پورفیری مس ± مولیبدن مورد مطالعه در ایران، به ویژه در کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان (Kerman magmatic copper belt, KMCB) است (به عنوان مثال، McInnes et al., 2005; Richards et al., 2012).

منطقه بم (شمال KMCB) از سنگ‌های آتشفشانی، توف‌های جریان خاکستر، سنگ‌های آتشفشانی آواری و رسوبی تشکیل شده است (شکل b۱). سنگ¬آهک¬های خاکستری رنگ کرتاسه و پالئوسن (Aghanabati et al., 1993) قدیمی‌ترین واحدهای سنگی این منطقه هستند که توسط سنگ‌های آتشفشانی ترشیری احاطه شده‌اند. توالی آتشفشانی ائوسن (Aghanabati et al., 1993) رشته کوه اصلی این منطقه را تشکیل می‌دهد. بخش پایینی این توالی شامل رسوبات آتشفشانی آواری با لایه‌بندی خوب، شامل کنگلومرای تخته¬سنگی، برش آواری، ماسه¬سنگ و سیلتستون با لایه‌های بین لایه‌ای گدازه داسیت و جریان خاکستر است. بخش میانی این توالی شامل توده داسیت، ریولیت و آندزیت به¬طور متناوب با لایه‌های توف است. این واحد عمدتاً در شرق و شمال¬شرقی منطقه رخنمون دارد. در غرب و شمال¬غربی، بخش بالایی توالی رخنمون دارد. این منطقه از توف‌های جریان خاکستر با لایه‌بندی خوب به همراه گدازه‌های آندزیت و تراکی بازالت فرعی تشکیل شده است. برخی از توده‌های آندزیت و دیوریت، توف‌های ائوسن را قطع کرده‌اند. گسل‌های متعددی بر سنگ‌ها تأثیر گذاشته

و در برخی نقاط، زون خردشدگی تشکیل داده‌اند. مغزه‌های حفاری اکتشافی حاوی سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی با سنگ‌شناسی گرانیتوئیدی در اعماق هستند (Miri et al., 2024). زون‌های دگرسانی گرمابی پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در این منطقه رخداد دارند که نشان‌دهنده کانه¬زایی مس پورفیری است.



شکل ۱- (a) نقشه زمین‌شناسی ایران (Ghasemi and Talbot, 2006) و موقعیت کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان و (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه بم (Aghanabati et al., 1993).

Fig. 1. (a) Geology map of Iran (Ghasemei and Talbot, 2006) and the location of the Kerman magmatic copper belt (KMCB) and (b) Geology map of the Bam area (Aghanabati et al., 1993).

۳-روش پژوهش

در طی عملیات‌های صحرایی صورت گرفته، تعداد ۵۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی برداشت گردید. مقاطع نازک-صیقلی از نمونه‌ها تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان بررسی و مطالعه گردیدند. سپس، تعداد ۴ نمونه از سنگ‌های آندزیتی که دارای بیوتیت‌های مناسب در راستای اهداف پژوهش بودند انتخاب شدند. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها توسط روش آنالیز ریزکاونده الکترونی (Electron probe micro analysis, EPMA) در محل دانشگاه لئوبن کشور اتریش و با استفاده از دستگاه Jeol JXA 8200 با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ Kv ، قطر جریان ۱۰ nA و زمان شمارش ۲۰ تا ۱۰۰ ثانیه تعیین شدند. خطوط پرتو ایکس و مواد کالیبراسیون طبیعی زیر مورد استفاده قرار گرفتند: ولاستونیت (Si-Kα)، امفاسیت (Al-Kα)، فلورآپاتیت (F-Kα؛ P-Kα؛ Ca-Kα)، آلبیت (Na-Kα)، فایلیت (Fe-Kα؛ Mn-Kα)، ارتوکلاز (K-Kα)، پریکلاز (Mg-Kα) و روتیل (Ti-Kα). داده‌های خام با روش تصحیح ZAF اصلاح شدند.

۴-سنگ‌نگاری

آندزیت‌ها در بیرون‌زدگی‌ها به رنگ خاکستری روشن تا قهوه‌ای رخنمون دارد. در سطح نمونه‌های دستی درشت بلورهای پلاژیوکلاز با چشم غیر مسلح قابل مشاهده می‌باشند. این سنگ‌ها دارای بافت‌های گلومروپورفیری، غربالی، میکرولیتی پورفیری، و حفره‌ای هستند. کانی‌های اصلی در این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز (۵۰ تا۶۰ درصد حجمی)، بیوتیت (۲۰ تا۳۰ درصد حجمی) و هورنبلند (۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی) می‌شوند. مگنتیت و پیریت مهمترین کانی‌ها فرعی بوده و سریسیت و کلریت کانی‌ها ثانویه می‌باشند. پلاژیوکلاز بخش زیادی از این نمونه‌ها را ، هم به صورت فنوکریست و هم به صورت میکرولیت در زمینه سنگ تشکیل می‌دهند. درشت‌بلورهای پلاژیوکلازها دارای بافت غربالی، منطقه‌بندی شیمیای و حاشیه‌های تحلیل رفته و گردشده هستند (شکل a۲ و b). چنانچه یک پلاژیوکلاز در درون ماگمایی قرار گیرد که با آن در تعادل نیست این بلورها توسط مذاب فرسایش یافته و ماگما به داخل آنها نفوذ می کند و بافت غربالی را تشکیل می دهد (Vernon, 2000).

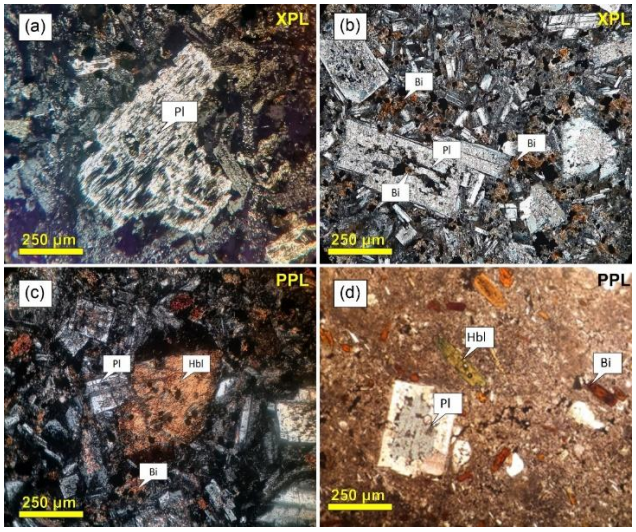
بیوتیت مهمترین کانی فرومنیزین موجود در نمونه‌های مورد مطالعه و در اندازه حدود ۱ تا ۰/۲ میلی‌متر و به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و عمدتاً در زمینه سنگ حضور دارد (شکل b۲). بیوتیت‌های درشت‌تر، دارای میانبارهایی از کانی-های اپک هستند. برخی از بیوتیت‌ها تا حدودی کلریتی هم شده‌اند. هورنبلند، دیگر کانی فرومنیزین این سنگ‌هاست. هورنبلندها به صورت بلورهای نیمه‌شکل و بی‌شکل و به رنگ سبز تا قهوه‌ای رخداد دارد (شکل c۲). هورنبلندها بر اثر متاسوماتیسم پتاسیک به بیوتیت تبدیل شده و برخی با کلریت و اپیدوت جایگزین گشته‌اند.

۵-نتایج

۵-۱-شیمی بیوتیت

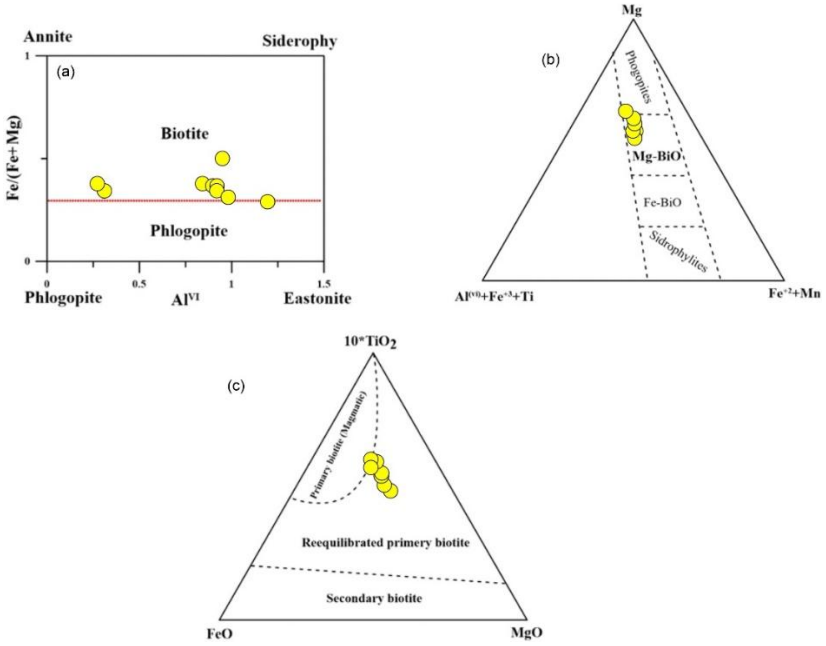
ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده‌اند. ترکیب ساختاری بیوتیت‌ها بر اساس ۱۱ اکسیژن و با استفاده از روش Li و همکاران (۲۰۲۰) محاسبه شده است. جهت رده‌بندی بیوتیت‌ها از نمودارهای آلومینیوم اکتاهدری (AlVI) در برابر نسبت Fe/(Fe+Mg) (Rieder et al., 1999) و نمودار سه‌تایی Foster et al., 1960) (AlVI+Fe3++Ti) - (Fe2++Mn) – Mg) استفاده گردید (شکل ۳). بیوتیت‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه شمال بم دارای مقادیر بالایی از Mg (۱/۷ تا ۲ apfu) هستند و همانطور که در این نمودارها مشخص است، نمونه‌ها در این نمودارها در محدوده بیوتیت و از نوع منیزیم بالا قرار می‌گیرند.

نمودار سه تایی FeO + MnO، 10×TiO2، MgO، (Nachit et al., 2005) می¬تواند بیوتیت¬های اولیه یا ماگمایی را از بیوتیت‌های اولیه¬ای که دستخوش تعادل دوباره شده¬اند و نیز بیوتیت¬های ثانویه جدا کند. براساس این نمودار بیوتیت¬های مورد بررسی غنی¬شدگی متوسطی در TiO2 دارند و از نوع بیوتیت¬های تعادل دوباره یافته هستند (شکل c۳).



شکل ۲- تصاویر مقاطع نازک نمونه‌های مورد بررسی. (a و b) درشت‌بلور پلاژیوکلاز با بافت غربالی، (c) درشت‌بلور هورنبلند و (d) درشت‌بلور پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی شیمیایی . علامت‌های اختصاری کانی‌ها شامل Bi: بیوتیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Hbl: هورنبلند و Pl: پلاژیوکلاز (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 2. Microphotographs from the studied samples. (a and b) sieved plagioclase phenocryst, (c) hornblende phenocryst, and (d) plagioclase phenocryst with chemical zoning. Mineral abbreviations are Bi: biotite, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende and Pl: plagioclase (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۳- رده‌بندی شیمیایی بیوتیت‌های مورد بررسی در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بم. (a) نمودار AlVI در برابر Fe/(Fe+Mg) (Rieder et al., 1999)، (b) نمودار سه‌تایی (AlVI+Fe3++Ti) - (Fe2++Mn) – Mg (Foster et al., 1960) و (c) نمودار سه‌تایی 10×TiO2 - FeO+MnO - MgO (Nachit et al., 2005).

Fig. 3. Chemical classification of the biotites from the north Bam volcanic rocks. (a) AlVI vs. Fe/(Fe+Mg) diagram (Rieder et al., 1999), (b) (AlVI+Fe3++Ti) - (Fe2++Mn) – Mg ternary diagram (Foster et al., 1960), and (c) 10×TiO2 - FeO+MnO – MgO ternary diagram (Nachit et al., 2005).

جدول ۱- ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های آندزیت‌ها شمال منطقه بم

Table 1. Chemical compositions of biotite in andesites and balsalts from the north Bam area.

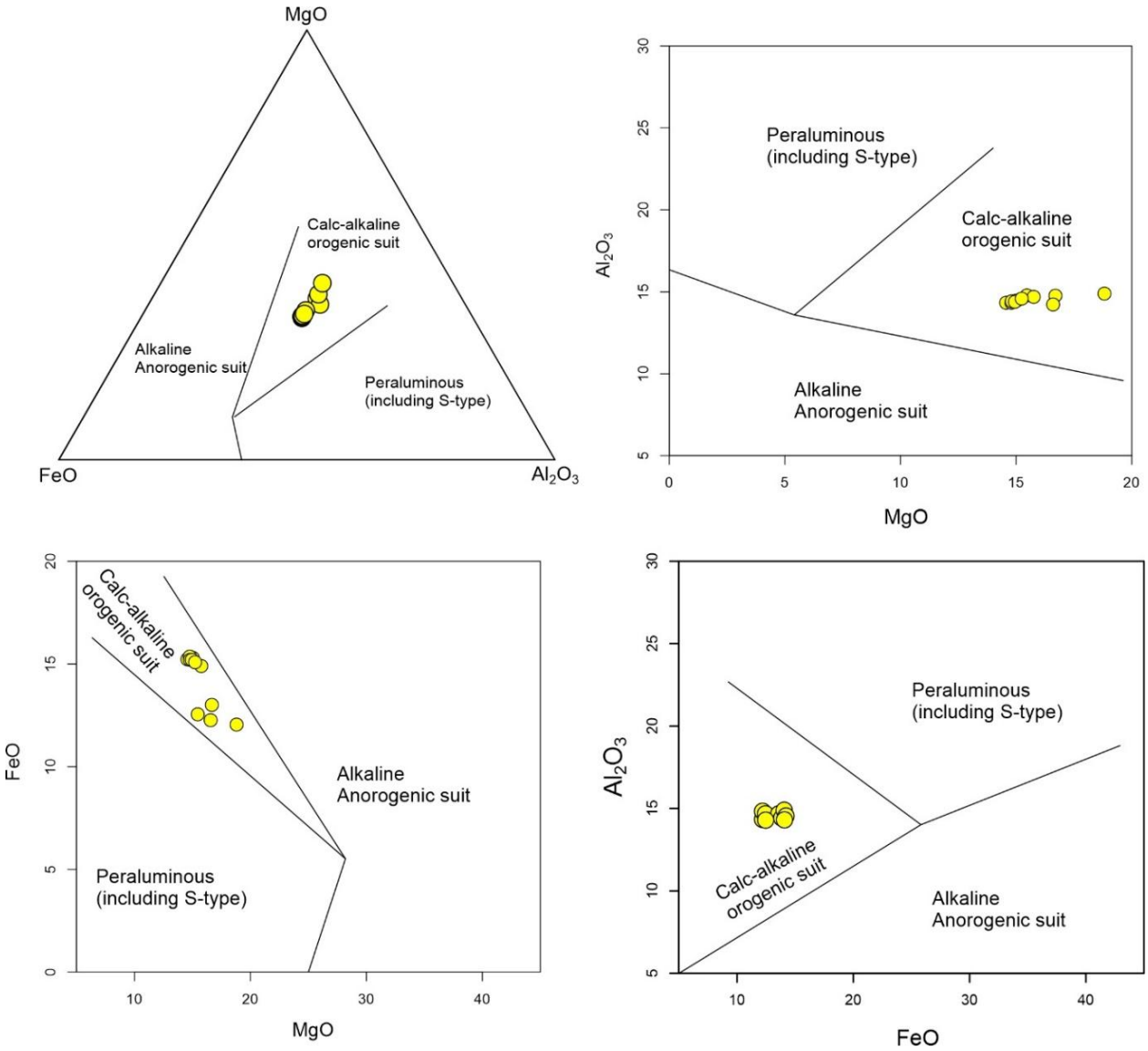
Nu	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
SiO_2	39.35	38.58	38.85	39.19	36.71	36.68	37.25	37.32	37.30	37.01	37.30
TiO_2	3.38	3.38	2.92	2.92	4.23	4.13	4.35	4.24	4.14	4.16	4.14
Al_2O_3	14.76	14.78	14.23	14.89	14.69	14.47	14.33	14.33	14.42	14.39	14.59
FeO	13.00	12.55	12.26	12.05	14.90	15.30	15.23	15.35	15.20	15.20	15.08
MnO	0.13	0.14	0.15	0.15	0.27	0.20	0.18	0.21	0.20	0.19	0.21
MgO	16.69	15.46	16.59	18.81	15.76	15.04	14.57	14.79	14.81	14.95	15.24
CaO	0.02	0.01	0.04	0.06	0.04	0.06	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03
Na_2O	0.30	0.31	0.34	0.33	0.60	0.56	0.55	0.58	0.57	0.61	0.61
K2O	9.09	8.85	9.36	8.66	8.19	8.27	8.54	8.56	8.42	8.53	8.32
total	96.72	94.06	94.74	97.05	95.39	94.71	95.05	95.38	95.08	95.06	95.49
T. Si	2.88	2.89	2.89	2.83	2.76	2.78	2.82	2.82	2.82	2.80	2.80
T.Al	1.04	1.03	1.01	1.10	1.17	1.14	1.10	1.09	1.10	1.11	1.12
$T.Fe^3$	0.08	0.08	0.10	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08
sum	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
M.Al	0.23	0.27	0.24	0.17	0.13	0.16	0.18	0.19	0.19	0.17	0.18
M.Mg	1.79	1.71	1.82	1.99	1.74	1.67	1.62	1.64	1.64	1.66	1.68
$M.Fe^2$	0.54	0.57	0.53	0.40	0.60	0.65	0.68	0.66	0.65	0.66	0.63
$M.Fe^3$	0.18	0.13	0.13	0.26	0.27	0.24	0.20	0.21	0.22	0.22	0.24
M.Ti	0.19	0.20	0.17	0.16	0.24	0.23	0.25	0.24	0.23	0.24	0.23
M.Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M.Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.Li	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sum	2.94	2.89	2.90	2.98	3.00	2.96	2.94	2.96	2.95	2.96	2.97
Vac	0.06	0.11	0.10	0.02	0.00	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.03
A.K	0.86	0.86	0.90	0.81	0.81	0.82	0.84	0.83	0.83	0.84	0.81
A.Na	0.04	0.04	0.05	0.05	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09

۶-سری ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی

با توجه به این که بیوتیت‌ها ماهیت و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگمای مادر را نشان داده و ترکیب بیوتیت در مجموع تابع ترکیب و شرایط تبلور ماگما است (Abdel-Rahman, 1994) بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک معیار مناسب برای شناسایی محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی استفاده نمود.

مقادیر Al2O3، MgO و FeO بیوتیت‌ها با سری‌های ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی ماگماهای مادر آنها ارتباط دارد (Abdel-Rahman, 1994). با استفاده از نمودارهای شکل ۴ می‌توان این موضوع را بررسی نمود. بر اساس این نمودارها، بیوتیت‌های سنگ‌های آذرین در سه گروه سنگ‌های آلکالن، کالک‌آلکالن و پرآلومین دسته بندی می‌شوند. اگرچه این نمودار در اصل برای بیوتیت‌های گرانیت‌ها ارائه شده است

اما استفاده از آنها در مورد دیگر سنگ‌ها نیز رایج است (مانند Faridazad and Ashrafi, 2025). بیوتیت‌های مورد بررسی در این نمودارها در محدوده ماگماهای کالک‌آلکالن قرار می‌گیرند که در جایگاه‌های زمین‌ساختی مرتبط با فرورانش تشکیل می‌شوند.



شکل ۴- نمودارهای تعیین جایگاه زمین‌ساختی و سری ماگمایی ماگماهای مادر بر اساس ترکیب بیوتیت‌ها (Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 4. Diagrams discriminating tectonic setting and magma series of the parent magmas based on the biotite compositions (Abdel-Rahman, 1994).

۷-ارتباط با کانه‌زایی

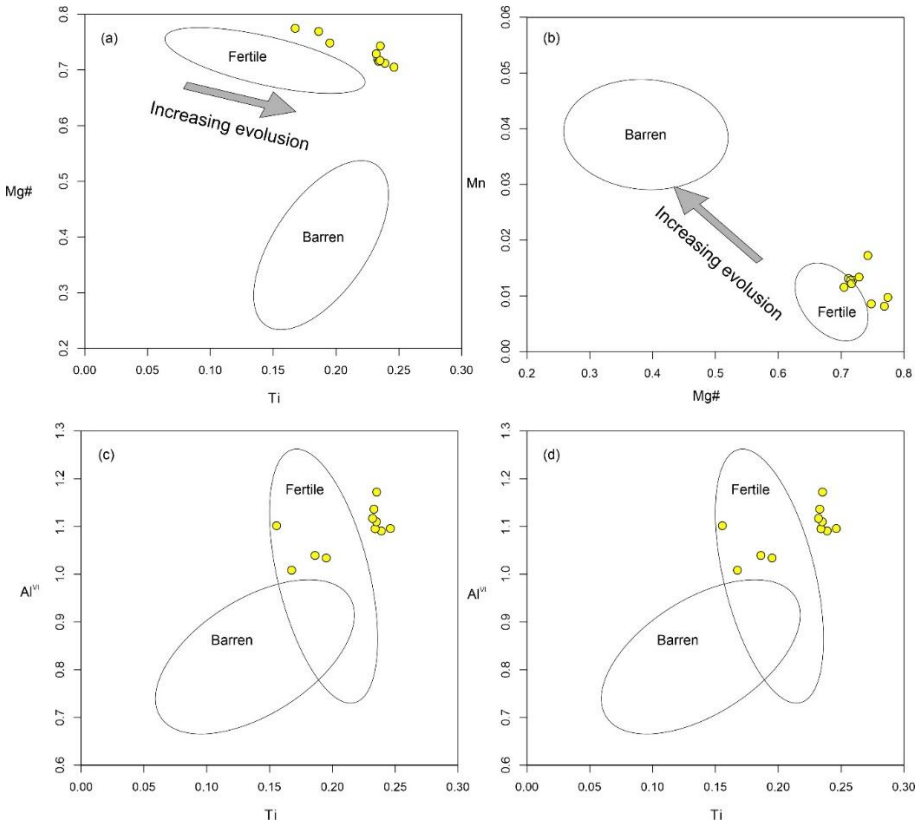
سنگ‌های آتشفشانی با ریشه‌های آتشفشان‌ها، یعنی همان استوک‌ها و باتولیت‌ها ارتباط زایشی دارند. به عبارت دیگر، آنها در واقع از یک ماگمای مادر مشترک مشتق شده، اما در اعماق مختلف تبلور یافته‌اند، به عبارت دیگر استوک‌ها در بخش‌های نیمه عمیق و نزدیک به سطح و گدازه‌ها بر روی سطح زمین تبلور یافته‌اند. بنابراین، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی در دسترس می‌توانند نماینده‌ای برای استوک‌ها پنهان در اعماق زمین باشند. با توجه به رخداد کانه‌زایی مس پورفیری در منطقه و ارتباط زایشی آنها با توده‌های نیمه عمیق مرتبط با کانه‌زایی (Miri et al., 2024)، در این بخش ترکیب شیمیایی بیوتیتِ آندزیت‌ها به‌عنوان یکی از شناساگرهای توان کانه‌زایی سنگ‌های آذرین مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی ارتباط ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های مورد مطالعه با کانه‌زایی مس پورفیری، بیوتیت‌ها با دیگر بیوتیت‌های بررسی شده در توده‌های گرانیتوئیدی کانه‌زا و نابارور مقایسه گردید (شکل ۵). از مقادیر #Mg (Mg/Mg+Fe2+)، Ti و AlVI برای این مقایسه استفاده شده است (Taghavi et al., 2022). در تمامی نمودارها، بیوتیت‌ها در محدوده ترکیب بیوتیت‌های توده‌های گرانیتوئیدی کانه‌زا قرار می‌گیرند.

شندروف و همکاران (Tischendorf, 2001) بر اساس تغییرات محتوای Mg و دیگر عناصر اصلی و فرعی، محدوده ترکیب رایج میکاها را رسم نموده‌اند (شکل ۶). Taghavi و همکاران (۲۰۲۲) از این نمودار برای مقایسه بیوتیت‌های توده‌های گرانیتوئیدی بارور و نابارور استفاده کردند که در شکل ۶ به صورت دو محدوده نمایش داده شده‌اند. نمونه‌های بیوتیت آندزیت‌های منطقه شمال بم بر روی دو نمودار MnO در برابر MgO و TiO2 در برابر Mg در محدوده ترکیب طبیعی (محدوده سایه زده شده) و نزدیک به بیوتیت‌های توده‌های کانه‌زا قرار می‌گیرند.

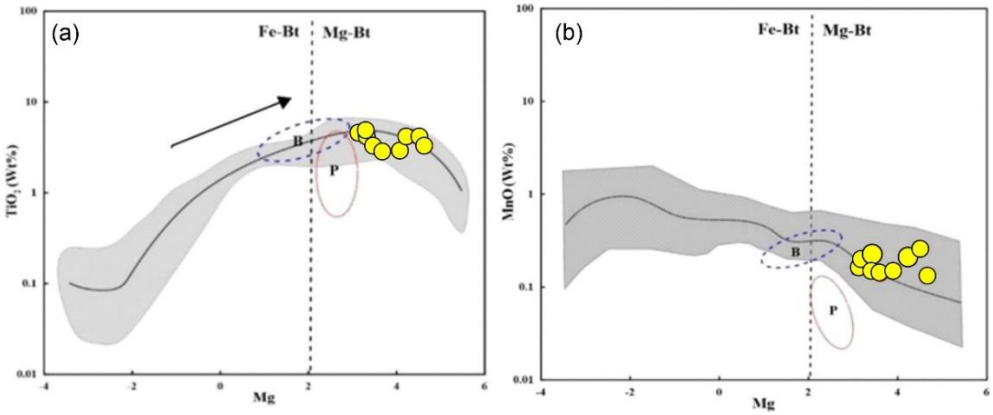
ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها همچنین می‌تواند نماینده شرایط اکسیداسیون و احیای محیط ماگمایی باشد. نمودار سه‌تایی Fe3+-Fe2+-Mg (Wonse and Eugster, 1965) یکی از متداول‌ترین نمودارها جهت تخمین فوگاسیته اکسیژن با استفاده از ترکیب بیوتیت‌هاست (شکل ۷). این نمودار محدوده‌های بافری هماتیت- مگنتیت (HM)، نیکل-نیکل اکسید (NNO) و فایالیت، مگنتیت، کوارتز (FMQ) را نمایش می‌دهد. در این نمودار گذر از محدوده بافری FMQ به سمت محدوده HM ناشی از افزایش فوگاسیته اکسیژن محیط می‌باشد (Sun et al., 2015). در این نمودار، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده Ni-NiO و محدوده توده‌های گرانیتوئیدی کانه‌زا قرار می‌گیرند. اگرچه قرارگیری بیوتیت‌ها در محدوده تعادل دوباره یافته (شکل ۳) نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آنها پس از تشکیل دستخوش تغییر شده و با محیط اطراف در طی دگرسانی به تعادل رسیده است. به عبارت دیگر، ترکیب آن نماینده شرایط فوگاسیته اکسیژن در طی دگرسانی می‌باشد.

بر اساس تمامی نمودارهای به کار رفته جهت مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که بیوتیت‌های آندزیت‌ها از نظر ترکیب شیمیایی و شرایط تشکیل با بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای کانه‌زا شباهت دارند. از سوی دیگر Miri و همکاران (۲۰۲۴) بر اساس شیمی سنگ‌کل نتیجه گرفتند که توده‌های گرانودیوریتی نیمه عمیق این منطقه دارای پتاسیل کانه‌زایی مس پروفیری هستند. با توجه به اینکه آندزیت‌ها با معادل نیمه عمیق خود دارای ارتباط ژنتیکی هستند، نتایج به دست آمده برای بیوتیت‌های آنها می‌تواند قابل تعمیم برای گرانودیوریت‌ها بوده و تایید کننده نتایج Miri و همکاران (۲۰۲۴) باشد.



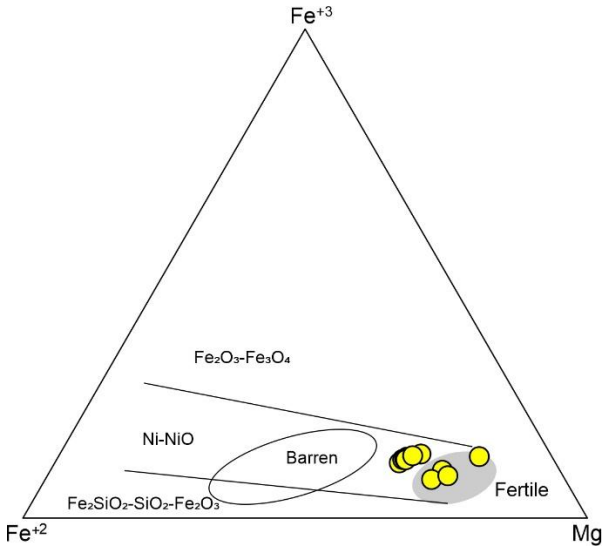
شکل ۵- مقایسه بیوتیت‌های آندزیت‌های منطقه بم با بیوتیت‌های توده‌های گرانیتوئیدی کانه‌زا و نابارور (Taghavi et al., 2022)

Fig. 5. Comparison of the andesit biotites with those of barren and productive granitoid bodies (Taghavi et al., 2022)



شکل ۶- مقایسه ترکیب بیوتیت‌های منطقه مورد مطالعه با بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای کانه‌زا و نابارور با استفاده از (a) نمودار تغییرات Mg در برابر TiO2و (b) نمودار تغییرات Mg در برابر MnO. محدوده نقطه‌چین نشانگر میانه یا ٪۵۰ بوده و ناحیه سایه‌دار محدوده بین ۱۵ تا ۸۵ درصد اطمینان را نشان می‌دهد (Tischendorf et al., 2001).

Fig. 6. Comparison of the composition of biotites from the study area with biotites from ore-bearing and barren granitoids using (a) Mg vs. TiO2 plot and (b) Mg vs. MnO diagrams. The dotted area indicates the median or 50%, and the shaded area indicates the range between 15 and 85% confidence (Tischendorf et al., 2001).



شکل ۷- نمودار Fe3+-Fe2+-Mg جهت تعیین فوگاسیته اکسیژن ماگمای مادر بیوتیت‌ها ().

Fig. 7. Fe3+-Fe2+-Mg diagram to determine oxygen fugacity of the biotite parent magma (Wones and Eugster, 1965)

۸-نتیجه‌گیری

بیوتیت‌های سنگ‌های آندزیتی منطقه شمال شهرستان بم از نوع غنی از منیزم (Mg-Biotite) هستند. این بیوتیت‌ها عمدتا از نوع تعادل مجدد یافته هستند که ترکیب آنها در طی فرآیندهای دگرسانی و واکنش با سیالات دستخوش تغییر شده است. ماگمای مادر این بیوتیت‌ها سرشت کالک‌آلکالن دارند و در یک پهنه فرورانشی شکل گرفته‌اند. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها نماینده شرایط فوگاسیته اکسیژن نیکل-نیکل اکسید می‌باشد. مقایسه بیوتیت‌های مورد بررسی با بیوتیت‌های توده‌های گرانیتوئیدی کانه‌زا نشان دهنده شباهت ترکیبی آنهاست. از آنجایی که سنگ‌های آتشفشانی عموما با معادل‌های نیمه‌عمیق خود دارای ارتباط ژنتیکی هستند، می-توان نتیجه گرفت که گرانودیوریت‌های منطقه مورد بررسی نیز دارای پتانسیل کانه‌زایی مس پورفیری بوده‌اند که این موضوع با بررسی‌های پیشین در منطقه سازگاری دارد.

مراجع

Abdel-Rahman, A.-F.M., 1994. Nature of Biotites from Alkaline, Calc-alkaline, and Peraluminous Magmas. Journal of Petrology 35, 525-541. https://10.1093/petrology/35.2.525

Aghanabati, A., Eftekharnejad, J., Samimi, M., Arshadi, S., 1993. Geology Map of the Bam area, Sacle 1:100,000. In. Tehran: Geology Servey of Iran.

Alavi, M., 1994. Tectonics of the zagros orogenic belt of iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229, 211-238. https://https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2

Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. American Journal of Science 304, 1-20. https://10.2475/ajs.304.1.1

Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of earth sciences 18, 210-265.

Bindi, L., Cellai, D., Melluso, L., Conticelli, S., Morra, V., Menchetti, S., 1999. Crystal chemistry of clinopyroxene from alkaline undersaturated rocks of the Monte Vulture Volcano, Italy. Lithos 46, 259-274.

Brod, J.A., Gaspar, J.C., De Araújo, D.P., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C., 2001. Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. Journal of Asian Earth Sciences 19, 265-296.

Cao, G., Tong, Y., Li, X., Wang, L., 2022. Insights from olivine chemistry into crustal magmatic processes and the mantle source lithology of basalts from Hainan Island, China. Lithos 430-431, 106852. https://https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106852

Faridazad, M., Ashrafi, N., 2024. Petrology and petrogenesis of a tuff layer in the Upper Red Formation, north of Tabriz (NW Iran): shoshonitic magmatism with high Ba and Sr affinity. Petrological Journal 15, 69-96. https://10.22108/ijp.2024.141582.1333

Foster, M.D., 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. In.

Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). Journal of Asian Earth Sciences 26, 683-693.

Halter, W.E., Heinrich, C.A., Pettke, T., 2005. Magma evolution and the formation of porphyry Cu–Au ore fluids: evidence from silicate and sulfide melt inclusions. Mineralium Deposita 39, 845-863.

Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. Tectonics 35, 586-621.

Kamali, A.A., Moayyed, M., Amel, N., Mohammad, F., Brenna, M., Saumur, B.M., Santos, J.F., 2020. Mineralogy, mineral chemistry and thermobarometry of post-mineralization dykes of the Sungun Cu–Mo porphyry deposit (Northwest Iran). Open Geosciences 12, 764-790.

Khosravi, M., Christiansen, E.H., Rajabzadeh, M.A., 2021. Chemistry of rock-forming silicate and sulfide minerals in the granitoids and volcanic rocks of the Zefreh porphyry Cu–Mo deposit, central Iran: Implications for crystallization, alteration, and mineralization potential. Ore Geology Reviews 134, 104150.

Li, J.X., Fan, W.M., Zhang, L.Y., Ding, L., Yue, Y.H., Xie, J., Cai, F.L., Quan, Q.Y., Sein, K., 2020a. Biotite geochemistry deciphers magma evolution of Sn-bearing granite, southern Myanmar. Ore Geology Reviews 121, 103565.

Li, X., Zhang, C., Behrens, H., Holtz, F., 2020b. Calculating biotite formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression. Lithos 356, 105371.

McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Fu, F.Q., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W.L., Bertens, A., Sukarna, D., Permanadewi, S., Andrew, R.L., 2005. Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian, and Iranian porphyry Cu-Mo-Au deposits. Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective (Porter, TM; editor). Porter Geoconsultancy Publishing, de Adelaide, Australia, 27-42.

Miri, M., Zarasvandi, A., Jalali, S.R., 2024. Geochemistry and Fertility Assessment of Sub-Volcanic Rocks from the Bam Area, North of the Kerman Magmatic Copper Belt, SE Iran. Geochemistry International 62, 300-313. https://10.1134/S0016702924030078

Mohajjel, M., Fergusson, C., Sahandi, M., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. Journal of Asian Earth Sciences 21, 397-412.

Nachit, H., Ibhi, A., Ohoud, M.B., 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites. Comptes Rendus. Géoscience 337, 1415-1420.

Pirajno, F., Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and wall rock alteration. Hydrothermal processes and mineral systems, 73-164.

Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. Reviews in mineralogy and geochemistry 69, 61-120.

Rezaei, M., Zarasvandi, A., 2022. Combined Feldspar-Destructive Processes and Hypogene Sulfide Mineralization in the Porphyry Copper Systems: Potentials for Geochemical Signals of Ore Discovering. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science 46, 1413-1424.

Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., 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, 295-332.

Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. Contributions to mineralogy and petrology 160, 45-66.

Rieder, M., Cavazzini, G., 1998. D'yakonov, yS. Frank-Kamenetskii, VA, Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval, PV, Müller, G., Neiva, AMR, Radoslovich, EW, Robert, J.-L., Sassi, FP, Takeda, H., Weiss, Z., and Wones, DR, 61-72.

Selby, D., Nesbitt, B.E., 2000. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu–Au–Mo mineralization, Yukon, Canada: evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry. Chemical Geology 171, 77-93.

Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. Economic geology 105, 3-41.

Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. AAPG bulletin 52, 1229-1258.

Sun, W., Huang, R.-f., Li, H., Hu, Y.-b., Zhang, C.-c., Sun, S.-j., Zhang, L.-p., Ding, X., Li, C.-y., Zartman, R.E., Ling, M.-x., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. Ore Geology Reviews 65, 97-131. https://https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004

Taghavi, A., Maanijou, M., Lentz, D.R., Sepahi-Gerow, A.A., Maruoka, T., Fujisaki, W., Suzuki, K., 2022. Biotite compositions and geochemistry of porphyry-related systems from the central Urumieh Dokhtar Magmatic Belt, western Yazd, Iran: Insights into mineralization potential. Lithos 412, 106593.

Taghipour, N., Aftabi, A., Mathur, R., 2008. Geology and Re-Os Geochronology of Mineralization of the Miduk Porphyry Copper Deposit, Iran. Resource Geology 58, 143-160.

Tischendorf, G., Förster, H.J., Gottesmann, B., 2001. Minor- and trace-element composition of trioctahedral micas: A review. Mineralogical Magazine - MINER MAG 65, 249-276. https://10.1180/002646101550244

Vernon, R., 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. Visual Geosciences 5, 1-23.

Wones, D., Eugster, H., 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application1. American Mineralogist 50, 1228-1272.

Zaheri–Abdehvand, N., Hassanpour, S., Rassa, I., Rajabpour, S., 2022. Silicates chemistry as indicators of physicochemical and geothermometry conditions on porphyry ore system: A case study of the Haftcheshmeh Cu–Mo deposit, NW Iran. Ore Geology Reviews 142, 104716.

Zarasvandi, A., Heidari, M., Raith, J., Rezaei, M., Saki, A., 2019. Geochemical characteristics of collisional and pre-collisional porphyry copper systems in Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Iran: Using plagioclase, biotite and amphibole chemistry. Lithos 326, 279-297.