Vol. 11, No. 1, Spring and Summer 2025, pp. 220-240 ISSN (Print): 2538-449X ISSN (Online): 2981-1619

Research Article
OPEN ACCESS
Kharazmi Journal of Earth Sciences
Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

Formation of magnetite as a key indicator for understanding the physicochemical conditions of porphyry Cu ـ Mo deposit formation: A case study from the Meiduk porphyry deposit in Kerman Province, southeastern Urumieh-Dokhtar zone

Adel Saki[1*], Peyman Eskandarnia[2], Alireza Zarasvandi[3], Naval Malohi[4]

1, 3, 4. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Article info

Article history
Received: 06 May 2025
Accepted: 27 August 2025

Keywords:
Urumieh–Dokhtar magmatic arc, Meiduk porphyry, EPMA, Magnetite.

Abstract

The Meiduk porphyry Cu ـ Mo deposit is located in the southern part of the Urumieh–Dokhtar magmatic arc within the Cenozoic magmatic belt of Kerman, Iran. Due to the widespread occurrence of magnetite as a minor phase in potassic and phyllic alteration zones, this deposit provides a suitable context for geochemical investigations. In this study samples were analyzed using Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) to assess the physicochemical conditions of magnetite formation. Elemental data indicate that the magnetites are predominantly of hydrothermal origin, characterized by high Ti and V and relatively low Al and Mn contents. These compositions suggest formation temperatures of 200–300°C. The chemical composition, especially Ti/V ratios and trace element distributions such as Co, Ni, and Cr, effectively distinguishes between magmatic and hydrothermal magnetites. Geochemical plots confirm that the studied magnetites fall within the porphyry field. Petrographic evidence, including the occurrence of magnetite in association with sulfide minerals such as chalcopyrite and pyrite, strongly supports the geochemical findings. This study highlights the potential of magnetite chemistry as a powerful tool for deciphering ore-forming processes in porphyry systems and demonstrates its applicability in exploration and modeling of concealed or deep-seated mineral deposits.

Introduction

Porphyry Cu-Mo deposits are among the most significant sources of base metals, particularly copper, molybdenum, and gold. These deposits are typically formed through magmatic-hydrothermal processes under specific physicochemical conditions. They are characterized by widespread hydrothermal alterations and complex mineral assemblages, making their exploration a scientific and practical challenge. Magnetite is one of the key minerals in these systems, and due to its high stability and ability to host a wide range of trace and rare elements, it provides valuable insights into geochemical processes and ore-forming conditions (Sillitoe, 2010; Meinert et al., 2005). The chemistry of magnetite, particularly the concentration of trace elements such as Ti, V, Mn, Cr, and rare earth elements, reflects parameters such as temperature, pressure, fluid composition, and redox conditions (Zarasvandi et al., 2023; Nadoll et al., 2014).

Recent advances in microanalytical techniques have significantly enhanced the use of magnetite chemistry as a reliable tool for distinguishing between different types of mineral deposits and identifying alteration stages (Grigsby, 1990; Wen et al., 2017). The elemental composition of magnetite is not only useful for reconstructing magmatic and hydrothermal environments but also plays a role in evaluating the economic potential of mineralized zones. In porphyry systems, magnetite occurs in various forms including vein-type, disseminated, and as part of potassic alteration assemblages, all of which can reveal critical information about ore-forming processes.

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.104462
***Corresponding author:** Adel Saki; **E-mail:** adel_saki@yahoo.com
How to cite this article: Saki, A., Eskandarnia, P., Zarasvandi, A. R., Malohi, N., 2025. Formation of magnetite as a key indicator for understanding the physicochemical conditions of porphyry Cu ـ Mo deposit formation: A case study from the Meiduk porphyry deposit in Kerman Province, southeastern Urumieh-Dokhtar zone. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(1), 220- 240. http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.104462

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

In the present study, the porphyry Cu - Mo deposit of the Miduk area is investigated with a focus on magnetite geochemistry. The aim is to reconstruct the physicochemical conditions during mineralization and assess the role of magnetite chemistry in exploration targeting of similar deposits in other regions of Iran.

Materials and Methods

During fieldwork, 50 igneous rock samples were collected from the Meiduk deposit. From these, 10 magnetite-bearing samples were selected for detailed analysis using Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA). The analyses were carried out using a JEOL JXA-8200 instrument at Montanuniversität Leoben, Austria. Various geochemical diagrams—including Ti vs. V, Fe vs. V/Ti, Al+Mn vs. Ti+V, and Ni vs. V—were used to interpret the origin, crystallization environment, and physicochemical formation conditions of the studied magnetites.

Results and Discussion

Results

The chemical compositions of the analyzed magnetites are characterized by high Ti and V concentrations and relatively low Al and Mn contents. Over 90% of the samples fall within the hydrothermal field typical of porphyry deposits, with only a few showing magmatic or re-equilibrated characteristics (Dupuis and Beaudoin, 2011). Based on elemental data and diagrammatic interpretation, the magnetites crystallized under low oxygen fugacity and temperatures ranging between 200 and 300°C. The Ni-V trends further support a progressive decrease in fO_2 during magnetite formation (Wu et al., 2019; Wang et al., 2014).

Discussion

The chemical signatures of magnetite, along with petrographic observations—such as its association with sulfide minerals (e.g., chalcopyrite and pyrite) and alteration minerals (e.g., chlorite and sericite)—highlight the dominant role of hydrothermal fluids in the ore-forming processes at Meiduk . The Ti/V and Al+Mn ratios serve as robust geochemical indicators for distinguishing porphyry-related magnetite from those in other mineralization types, such as IOCG or skarn (Nadoll et al., 2015; Wen et al., 2017). These results suggest that magnetite precipitation occurred alongside a temperature drop and decreasing oxygen fugacity, both of which are key factors in initiating sulfide mineralization (Simon et al., 2008; Singoyi et al., 2006; Balan et al., 2006).

Conclusions

The study confirms that magnetite chemistry is a reliable and sensitive indicator for reconstructing physicochemical conditions in porphyry-style systems. The findings enhance our understanding of magmatic–hydrothermal processes and demonstrate the applicability of magnetite geochemistry in targeted exploration of concealed or deep-seated porphyry deposits (Sinclair, 2007; Cooke et al., 2014).

References

Balan, E., De Villiers, J.P.R., Eeckhout, S.G., Glatzel, P., Toplis, M.J., Fritsch, E., Allard, T., Galoisy, L., Calas, G., 2006. The oxidation state of vanadium in titanomagnetite from layered basic intrusions. American Mineralogist 91, 953-956.

Cooke, D.R., Baker, M., Hollings, P., Sweet, G., Chang, Z., Danyushevsky, L., Gilbert, S., Zhou, T., White, N.C., Gemmell, J.B., Inglis, S., 2014. New Advances in Detecting the Distal Geochemical Footprints of Porphyry Systems—Epidote Mineral Chemistry as a Tool for Vectoring and Fertility Assessments. In: Kelley, K.D., Golden, H.C. (Eds.), Building Exploration Capability for the 21st Century. Society of Economic Geologists.

Dupuis, C., Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. Mineralium Deposita 46, 319–335.

Grigsby, J.D., 1990. Detrital magnetite as a provenance indicator. Journal of Sedimentary Research 60, 940–951.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H.,

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists.

Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D., Walshe, J., 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. Ore Geology Reviews 61, 1–32.

Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., Koenig, A.E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. Mineralium Deposita 50, 493–515.

Sillitoe, R., 2010. Porphyry Copper Systems. Economic Geology 105, 3–41.

Simon, A.C., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Mengason, M., Englander, L., 2008. The effect of crystal-melt partitioning on the budgets of Cu, Au, and Ag. American Mineralogist 93, 1437–1448.

Sinclair, W., 2007. Porphyry deposits. In: Goodfellow, W.D. (Ed.), Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 223–243.

Singoyi, B., Danyushevsky, L., Davidson, G., Large, R., Zaw, K., 2006. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA-ICP-MS technique. Abstracts of Oral and Poster Presentations from the SEG 2006 Conference, 367–368.

Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G., Emil Berador, A., 2021. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: Perspective from the giant Cretaceous Atlas porphyry Cu–Au deposit (Cebu, Philippines). Ore Geology Reviews 133, 104084.

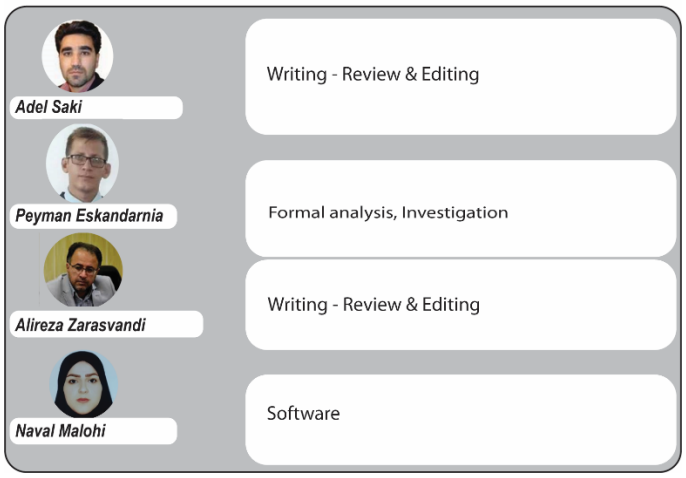
Wang, M., Gutzmer, J., Michalak, P.P., Guo, X., Xiao, F., Wang, W., Liu, K., 2014. PGE geochemistry of the Fengshan porphyry–skarn Cu–Mo deposit, Hubei Province, Eastern China. Ore Geology Reviews 56, 1–12.

Wen, G., Li, J.-W., Hofstra, A., Koenig, A., Lowers, H., Adams, D., 2017. Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton. Geochimica et Cosmochimica Acta, 213.

Wu, C., Chen, H., Hong, W., Li, D., Liang, P., Fang, J., Zhang, L., Lai, C., 2019. Magnetite chemistry and implications for the magmatic-hydrothermal ore-forming process: An example from the Devonian Yuleken porphyry Cu system, NW China. Chemical Geology 522, 1–15.

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Taheri, M., Asadi, S., Heidari, M., 2023. Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran: A record of deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems. Journal of Geochemical Exploration 249, 107213.

CRediT authorship contribution statement



[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

جلد ۱۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۲۰ تا ۲۴۰ شاپا چاپی: ۴۴۹x- ۲۵۳۸ شاپا الکترونیکی: ۱۶۱۹-۲۹۸۱

مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

زایش مگنتیت کلیدی بر شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسارهای مس ـ مولیبدن پورفیری؛ منطقه مطالعاتی کانسار پورفیری میدوک

عادل ساکی*[۱]، پیمان اسکندرنیا[۲]، علیرضا زراسوندی[۳]، نوال ملوحی[۴]

۱، ۳، ۴. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

واژه‌های کلیدی

کمان ماگمایی ارومیه ـ دختر، پورفیری میدوک، EPMA، مگنتیت.

چکیده

کانسار پورفیری مس ـ مولیبدن میدوک در بخش جنوبی کمان ماگمایی ارومیه ـ دختر و در محدوده کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان واقع شده است. این کانسار به‌واسطه حضور گسترده مگنتیت به‌عنوان یکی از کانی‌های فرعی در زون‌های دگرسانی پتاسیک و زون انتقالی بین زون پتاسیک و فیلیک، بستری مناسب برای تحلیل‌های ژئوشیمیایی فراهم کرده است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تشکیل مگنتیت‌ها، نمونه‌های انتخاب شده توسط دستگاه EPMA آنالیز شدند. نتایج تجزیه عنصری نشان داد که مگنتیت‌های منطقه با غلظت بالای Ti و V و مقدار نسبتاً پایین Al و Mn عمدتاً منشأ گرمابی داشته و در شرایط دمایی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فوگاسیته اکسیژن نسبتاً پایین شکل گرفته‌اند. ترکیب شیمیایی این کانی‌ها به‌ویژه نسبت Ti/V و پراکندگی عناصر فرعی نظیر Co، Ni و Cr توانست به‌خوبی تمایز میان مگنتیت‌های ماگمایی و گرمابی را نشان دهد. تحلیل نمودارهای مختلف نیز تأیید کرد که مگنتیت‌های مورد مطالعه در محدوده مشخصه کانسارهای پورفیری قرار دارند. براساس شواهد پتروگرافی، پراکندگی مگنتیت همراه با کانی‌های سولفیدی نظیر کالکوپیریت و پیریت، همخوانی کامل با نتایج شیمیایی دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که شیمی مگنتیت می‌تواند به‌عنوان ابزار مؤثری در شناسایی و مدل‌سازی فرآیندهای کانه‌زایی در سیستم‌های پورفیری به کار رود و راهگشای توسعه روش‌های نوین اکتشاف در ذخایر پنهان و یا عمقی باشد.

مقدمه

براساس مطالعات سیلیتو (Sillitoe, 2010) ذخایر پورفیری ذخایری با عیار کم و حجم زیاد تعریف می‌گردند که در اثر نهشت از سیالت با منشأ ماگمایی شکل گرفته‌اند. این ذخایر ویژگی‌های خاصی دارند که آن‌ها را از سایر انواع کانسارهای معدنی متمایز می‌کند. ذخایر پورفیری مس ـ مولیبدن از منابع مهم فلزات پایه هستند که معمولاً در ارتباط با فرآیندهای ماگمایی ـ هیدروترمال تشکیل می‌شوند. این ذخایر دارای ویژگی‌های خاصی از جمله ترکیب معدنی پیچیده و شرایط دگرسانی گسترده هستند که آن‌ها را به یک چالش در اکتشاف تبدیل می‌کند. مطالعات شیمی کانی روشی است که امروزه بسیاری از محققان زمین شناسی به منظور مطالعه‌ی شرایط فیزیکوشیمیایی و سایر مطالعات زمین شناسی از آن استفاده می‌نمایند (Davodi et al., 2025; Arabzadeh et al., 2023; Saki et al., 2020; Eskandarnia et al., 2020). شیمی کانی‌های مختلف موجود در ذخایر پورفیری، مانند مگنتیت، می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره‌ی محیط تشکیل و مراحل مختلف دگرسانی ارائه دهد (Sillitoe, 2010).

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.104462

***نویسنده مسئول:** عادل ساکی adel_saki@yahoo.com

استناد به این مقاله: ساکی، ع.، اسکندرنیا، پ.، زراسوندی، ع. ر.، ملوحی، ن. (۱۴۰۴). زایش مگنتیت کلیدی بر شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسارهای مس ـ مولیبدن پورفیری؛ منطقه مطالعاتی کانسار پورفیری میدوک. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۱، صفحه ۲۲۰ تا ۲۴۰. http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.104462

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

براساس مطالعات سینکلایر (Sinclair, 2007) پورفیری‌ها مهم‌ترین منبع مس و مولیبدن در دنیا بوده و از منابع مهم طلا، نقره و قلع می‌باشند که همراه آن‌ها فلزاتی مانند رنیم، تنگستن، پلاتین، پالادیم نیز یافت می‌گردد. طیف گسترده‌ای از دگرسانی‌های هیدروترمالی در نهشته‌های پورفیری موجب شده که به منظور کارهای اکتشافی مورد توجه زیاد قرار گیرند (Cooke et al., 2014; Shen et al., 2014). مگنتیت یکی از ترکیبات آهنی است که در ذخایر پورفیری به‌طور فراوان یافت می‌شود. این کانی می‌تواند بازتاب‌دهنده‌ی شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر فرآیندهای معدنی باشد. به‌ویژه، شیمی مگنتیت می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید برای شبیه‌سازی شرایط دگرسانی شامل دما، فشار، و ترکیب سیالات، مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر بالای عناصر جزئی مانند تیتانیوم (Ti)، وانادیوم(V) ، منگنز (Mn)و کروم (Cr) در مگنتیت می‌توانند به تفکیک ذخایر مختلف کمک کنند و در تشخیص مناطق احتمالی برای اکتشافات بعدی مؤثر باشند (Zarasvandi et al., 2023). مگنتیت تحت شرایط بسیار متنوعی از تبلور در حرارت بالا در ترکیبات سیلیکاته و فلزات سولفیدی تا سیالات گرمابی حرارت پایین ته‌نشست می‌یابد. مگنتیت می‌تواند در اثر واکنش با آندرادیت و کوارتز موجب تشکیل کانی کمیاب ایلویت شود که این حاصل دگرسانی پسرونده مگنتیت با دو کانی مذکور می‌باشد (Tale Fazel, 2023). به دلیل جایگیری طیف بالایی از عناصر فرعی و کمیاب در مگنتیت، می‌توان از ترکیب عنصری مگنتیت جهت تفکیک و تمایز شرایط مختلف در بازه زمانی تشکیل مگنتیت بهره گرفت. همچنین، این کانی تحت شرایط مختلف مکانیکی و دگرسانی‌های شیمیایی مقاوم است، لذا ابزار مناسبی برای انجام پژوهش‌های سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی محسوب می‌گردد. براساس مطالعات انجام شده در این رابطه، می‌توان از شاخص‌های بافتی-عنصری مگنتیت برای بررسی فرآیندهای انحلال و ته‌نشست استفاده کرد (Wen, 2017). با افزایش توانایی آزمایشگاهی در تعیین طیف مختلف عناصر با غلظت اندک در مگنتیت، استفاده از شیمی این کانی برای تعیین شرایط مختلف ماگمایی-هیدروترمال افزایش یافته است. از این‌رو می‌توان از مطالعه تغییرات در پراکنش و غلظت عناصر نادر در مگنتیت به منظور اکتشاف کانسارهای فلزی مختلف استفاده نمود (Grigsby, 1990; Yang, 2009; Nadoll et al., 2014). البته بهره‌گیری از مگنتیت به منظور اکتشافات کانیایی، نیازمند این مهم است که فرآیندهای کنترل کننده غلظت عناصر نادر در این کانی به خوبی شناخته شوند (Dare, 2014)؛ البته باید به این مورد توجه داشت که قبل از شیمی مگنتیت بایستی مطالعات بافتی انجام و مطمئن شد که بافت‌های انحلالی یا محلول جامد و تجزیه‌ای نداشته باشد. شیمی مگنتیت توسط فاکتورهای مختلفی نظیر fO_2، fS_2، سرعت سرد شدن، نسبت بلور/مذاب و ترکیب سیال کنترل می‌شود (Mollo et al., 2013). افزون بر این، پارامترهایی از قبیل دما، فشار نیز تأثیر بسزایی بر شیمی مگنتیت و قرارگیری عناصر مختلف در ترکیب این کانی، دارند (Pisiak, 2014). به عنوان مثال در مطالعه‌ای برروی آنومالی اهن درگز در جنوب شرق کهنوج با استفاده از شیمی کانی جفت کانی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت محدوده دمایی سرد شدن و فوگاسیته اکسیژن تخمین زده شده است (Karimi Shahraki et al., 2019). این شاخص‌ها ابزارهای مناسبی جهت مطالعات ژئوشیمیایی سامانه‌ها و کانسارهای تشکیل شده در شرایط و محیط‌های مختلف است (Whalen and Chappel, 1988). برای نمونه، مطالعه شیمی مگنتیت در محیط‌های مختلف آذرین و گرمابی، می‌تواند ابزاری بسیار مناسب جهت تمایز نواحی با پتانسیل کانه‌زایی اقتصادی و مناطق غیرکانه‌زا باشد (Dupuis and Beaudoin, 2011). مگنتیت در کانسارهای پورفیری، به اشکال مختلف به ویژه رگه‌ای تشکیل می‌شود. رگه‌های حاوی مگنتیت در سیستم‌های پورفیری به صورت معمول از رگه‌های اولیه شامل مگنتیت تا رگه‌های پیچیده شامل مگنتیت-پیریت-کالکوپیریت-کوارتز-اپیدوت مشاهده می‌شوند (Sillitoe, 2010). افزون بر این، مگنتیت در دگرسانی پتاسیک به صورت افشان از سیالات غنی از آهن نیز تشکیل می‌شود (Meinert, 2005). فراوانی بیش از ۱۰ درصدی مگنتیت در کانسارهای پورفیری سبب شده که

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

بررسی شیمی این کانی به ویژه پراکنش عناصر کمیاب، از اهمیت ویژه‌ای برای مطالعه کانسارهای پورفیری برخوردی باشد (Nadoll et al., 2015; Nadoll et al., 2014). تعدادی از نویسندگان نظیر (Simon et al., 2008; Singoyi et al., 2006) عناصر مختلفی از قبیل Cr, Cu, As, Mo, Ag, Au, Pb و REEs را در مگنتیت‌ها به ویژه انواع گرمابی گزارش کرده‌اند که نشان دهنده تنوع شیمی این کانی در کانه‌زایی‌های مختلف است؛ با توجه به این موضوع می‌توان گفت که غلظت عناصر منگنز، آهن، تیتانیم، منیزیم، آلومینیوم، کروم و وانادیم در ترکیب مگنتیت متفاوت است به گونه‌ای که غلظت‌های وانادیم بالاتر در مراحل ماگمایی و پیش از کانه‌زایی یافت می‌شود، در حالی که Al و Si در مراحل کانه‌زایی و ثانویه به بالاترین میزان می‌رسند (Zarasvandi et al., 2023). در این مطالعه با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز EPMA بر روی کانی مگنتیت شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسار مس ـ مولیبدن پورفیری میدوک مورد بررسی قرار گیرد.

زمین‌شناسی منطقه

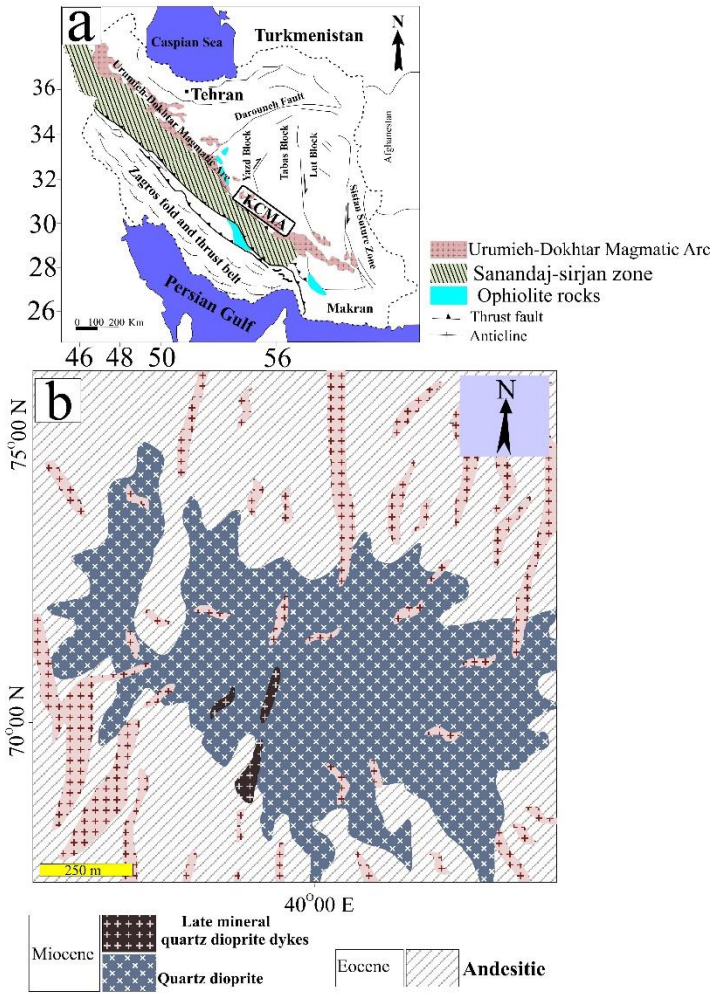
کمربند فلز- کوهزایی زاگرس در غرب ایران واقع شده است و از سه پهنه‌ی موازی شامل؛ کمربند چین خورده ـ رورانده‌ی زاگرس، پهنه‌ی دگرگونی سنندج ـ سیرجان و کمان ماگمایی ارومیه ـ دختر تشکیل شده است (شکل ۱a) (Alavi, 2004; Mohajjel et al., 2003). توسعه ژئوتکتونیکی کوه‌زاد زاگرس تحت تأثیر تکامل اقیانوس نئوتتیس انجام شده است که می‌توان این تکامل را به شرح زیر خلاصه نمود: ۱) فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرد قاره ایران مرکزی (کرتاسه زیرین- کرتاسه پسین)، ۲) بالاآمدگی قطعاتی از پوسته اقیانوسی نئوتتیس بر روی بخش حاشیه‌ی غیر فعال ورقه‌ی آفریقایی ـ عربی، ۳) برخورد میان ورقه‌ی ایران و حاشیه‌ی قاره‌ای آفریقایی ـ عربی و در پی آن بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در طی ترشیری (Ghasemi and Talbot, 2006; Alavi, 2007). کمربند ماگمایی ارومیه ـ دختر با طول ۲۰۰۰ کیلومتر از شمال‌غرب به جنوب‌شرق کشیده شده است (شکل ۱b)، ویژگی مشخصه‌ی این بخش از کوه‌زاد زاگرس، رخداد سنگ‌های آذرین نفوذی و خروجی با سن ائوسن تا کواترنری است؛ در حالی که شدت ماگماتیسم این زون را ائوسن می‌دانند (Berberian and Berberian, 1981; Alavi, 2004). این فعالیت‌ها با تزریق توده‌های نفوذی ائوسن تا میوسن به درون توالی ضخیمی (حدوداً ۱۵ کیلومتر) از گدازه‌ها، مواد پیروکلاستیک و ولکانوکلاستیک ادامه یافته است. مطالعات نشان می‌دهد که در اواخر این مرحله فعالیت‌های آذرین ماهیت آداکیتی داشته‌اند (Agard et al., 2011; Ghorbani and Bezenjani, 2011). به طور کلی، دو نظریه برای فعالیت آداکیتی در این زون ارائه شده است: ۱) ذوب ورقه اقیانوسی فرورونده (Jahangiri, 2007) و ۲) ذوب بخشی پوسته تحتانی ضخیم شده (Shafiei et al., 2009; Asadi et al., 2014)؛ که نظریه اول بر خصوصیات ژئوشیمیایی آتشفشانی پس از برخورد در شمال غرب ایران و نظریه دوم بر ویژگی‌های ژئودینامیکی و ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی پورفیری مناطق برخوردی در جنوب شرق ارومیه ـ دختر (منطقه‌ی کرمان) استوار است. براساس مطالعه‌ای که ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2012) بر روی نهشته‌های پورفیری مس± مولیبدن± طلا در سه سیستم مجزای کمانی مرتبط با نئوتتیس در مرکز و شرق ایران و غرب پاکستان انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیدند که ماگماها دچار تکامل زمانی و ژئوشیمیایی شده‌اند؛ بدین شکل که ماگماهای کمان آتشفشانی به ماگماهای دارای پتانسیل زایش سیستم پورفیری تکامل یافته‌اند و این تکامل به شکل تکامل ژئوشیمیایی و آبدارتر شدن بوده است. توده‌های نفوذی مرتبط با سیستم‌های پورفیری‌ها در زون ارومیه ـ دختر معمولاً سن میوسن دارند (Shafiei et al., 2009). مهم‌ترین سیستم‌های پورفیری در زون ارومیه دختر در بخش جنوبی این زون یعنی کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان رخ داده‌اند. کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان منطقه‌ای به طول تقریبی ۴۵۰ و عرض ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر با ویژگی‌های مشخصه‌ی نوع آندی و سیستم‌های کمانی کردیلرایی در جنوب بلوک ایران مرکزی گسترش یافته است (Dewey et al., 1973; Shafiei et al., 2009). شدت فعالیت‌های آتشفشانی و آذرین در منطقه‌ی کرمان را ائوسن میانی و

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

الیگومیوسن گزارش داده‌اند (Hassanzadeh, 1993). منطقه‌ی کرمان میزبان نهشته‌ی کانسار مس ـ مولیبدن پورفیری سرچشمه (با میزان ذخیره‌ی ۱/۷ میلیارد تن، عیار مس ۰/۶۵، عیار مولیبدن ۰/۰۲، عیار نقره ۱/۲۲ پی پی ام و عیار طلا ۰/۰۶ پی پی ام (Parandoush et al., 2019) و همچنین نهشته‌ی بزرگ مس ـ مولیبدن پورفیری میدوک (با میزان ذخیره‌ی ۱۷۰ میلیون تن و عیارمس ۰/۸۶ ٪ (Taghipour et al., 2007) می‌باشد. بزرگترین نهشته‌های مس پورفیری شناخته شده در منطقه‌ی کرمان از نظر ژنتیکی با گرانیتوئید-های کوهزایی با سن اواسط ـ اواخر میوسن ـ پلیوسن و نسبت Sr/Y بالا (پورفیری‌های آداکتی یا شبه آداکتی) همراه بوده و به گرانیتوئید-های تیپ کوه پنج معروف می‌باشند (McInnes et al., 2003; Shafiei et al., 2009; Mohammaddoost et al., 2017). نهشته-های موجود در منطقه‌ی کرمان با برخورد میان آلپ ـ هیمالیا همخوانی دارد و به وسیله آن‌ها می‌توان به دلایل و شواهد کلیدی برای وجود یا عدم وجود کانه‌زایی مس در کمان سنوزوئیکی کرمان دست یافت؛ بدین شکل که انتقال ماگماتیسم کالک آلکالن طبیعی در ائوسن ـ الیگوسن (نوع جبال بارز) به ماگماتیسم کالک آلکالن شبه آداکیتی در اواسط تا اواخر میوسن-پلیوسن (نوع کوه‌پنج) نشان دهنده‌ی شروع برخورد میان ورقه آفریقایی ـ عربی و اوراسیا در بخش کمان سنوزوئیکی کرمان می-باشد (Asadi et al., 2014). توده نفوذی مرتبط با کانه‌زایی مس ـ مولیبدن پورفیری میدوک در ۱۳۵کیلومتری شمال غرب سرچشمه و در شمال شهر بابک واقع شده است (شکل ۱). سنگ‌های مربوط به توالی آتشفشانی ـ رسوبی رازک در کمان ماگمایی ارومیه- دختر این نهشته را میزبانی می‌کنند (Hassanzadeh, 1993). در این منطقه استوک کوارتز دیوریتی به وسیله‌ی تعداد زیادی دایک با روند شمال ـ شمال شرق قطع شده است (شکل ۱ - b). استوک‌های کوارتز دیوریت که شدیداً دگرسان شده عامل کانه‌زایی در این کانسار بوده که حاوی ۴۰ تا ۵۰ درصد کانی‌های درشت بلور پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند و بیوتیت است که در زمینه ریزبلور از کانی-های کوارتز، بیوتیت، تیتانیت، آپاتیت، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم و انیدریت قرار گرفته است (Asadi et al., 2014). سن جایگیری توده نفوذی در واحدهای آتشفشانی ـ رسوبی رازک نیز با سن سنجی که بر روی مولیبدنیت به روش Re-Os انجام گرفته حدود ۱۲/۲۳±۰/۰۷ میلیون سال است (Taghipour, 2007).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]



شکل ۱- a) نقشه‌ی پهنه ساختاری ایران (Ghasemi and Talbot, 2006) b) موقعیت زمین‌شناسی توده‌ی پورفیری میدوک (McInnes et al., 2003)

Fig. 1. a) Structural zone map of Iran (Ghasemi and Talbot, 2006); b) Geological position of the Meiduk porphyry intrusion (McInnes et al., 2003).

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش حاضر، طی عملیات صحرایی تعداد ۵۰ نمونه از سنگ‌های آذرین توده نفوذی میزبان کانه‌زایی در نقاط مختلف محدوده برداشت گردید. از این میان، ۲۵ نمونه مقاطع نازک - صیقلی تهیه شد، پس از مطالعه مقاطع، تعداد ۱۰ عدد از آن‌ها انتخاب و برای انجام آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه EPMA در دانشگاه مونتان یونیورسیتات لئوبن در کشور اتریش ارسال گردید. مدل دستگاه Jeol EPMA JXA 8200 بود، ولتاژ ۱۵ kV، جریان آمپر ۱۰ nA و قطر باریکه الکترونی ۱ میکرومتر استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، طی انجام آزمایش مدت زمان خوانش دستگاه برای پیک و زمینه به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ ثانیه بوده است. حد تشخیص (به صورت درصد وزنی) توسط نرم افزار Integrated Jeol Software درونی دستگاه محاسبه و شامل ۰/۰۱ برای آلومینیوم، ۰/۰۲۴ برای کروم، ۰/۰۲۳ برای آهن و منگنز، ۰/۰۱۲ برای منیزیم، ۰/۰۱۹ برای تیتانیوم و ۰/۰۲۷ برای وانادیم است. پیش از انجام آزمایش و به منظور دستیابی به داده‌های دقیق‌تر و با کیفیت‌تر، کلیه نمونه‌ها تحت پوشش کربنی قرار گرفتند. در این مطالعه به منظور تعیین نمونه‌های شاخص برای آنالیز، کانه‌نگاری نمونه‌ها همراه با بررسی طیف EDX و تصاویر

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

میکروسکوپ الکترونی BSE برای تعیین دقیق ادخال‌ها و کانی‌های همراه مگنتیت، جدایش تیغه‌های ایلمینیت و نمونه‌های مارتیتی شده انجام گردید.

جدول ۱- نتایج تجزیه EMPA مگنتیت‌های زون دگرسانی پتاسیک کانسار میدوک (بر حسب درصد وزنی)

Table 1. EMPA results (wt. %) of magnetite analysis from the potassic alteration zone of Meiduk deposit

Elemants / oxides / Sample No	TiO_2	V_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	NiO	CuO	ZnO	CaɵO	Total
1	1.76	0.42	0.14	0.11	96.36	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	98.91
2	3.11	0.35	0.05	0.09	96.11	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	99.76
3	0.24	0.32	0.25	0.13	96.60	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	97.63
4	2.86	0.31	1.59	0.11	88.48	0.05	0.51	0.00	0.00	0.02	0.00	93.92
5	1.49	0.37	0.18	0.13	94.66	0.04	0.03	0.00	0.06	0.09	0.00	97.04
6	0.09	0.29	0.14	0.05	96.83	0.02	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00	97.53
7	0.22	0.33	0.14	0.09	97.33	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.13
8	0.14	0.35	0.16	0.09	96.98	0.02	0.03	0.01	0.08	0.00	0.00	97.87
9	5.82	0.24	2.47	0.23	76.72	0.00	0.05	0.05	0.00	0.02	0.00	85.59
10	1.78	0.31	0.52	0.26	92.61	0.04	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	95.58
11	0.02	0.30	0.36	0.47	96.31	0.06	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	97.59
12	0.16	0.35	0.72	0.00	96.69	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	98.07
13	0.10	0.24	0.40	0.20	97.08	0.08	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	98.22
14	0.07	0.36	0.27	0.05	97.45	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	98.24
15	0.17	0.31	0.80	0.12	94.38	0.12	0.25	0.00	0.07	0.04	0.00	96.25
16	0.11	0.28	0.25	0.14	95.85	0.00	0.16	0.00	0.00	0.03	0.00	96.81
17	0.06	0.29	0.23	0.09	97.05	0.09	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	97.86
18	0.12	0.24	0.96	0.23	93.47	0.04	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	95.76
19	0.12	0.30	0.40	0.21	95.61	0.00	0.11	0.00	0.00	0.05	0.00	96.79
20	0.07	0.31	0.34	0.19	96.48	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	97.49
21	12.02	0.46	0.14	0.33	84.54	2.42	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	99.93
22	19.94	0.56	0.29	0.29	76.82	1.66	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	99.61
23	0.22	0.34	0.22	0.18	96.28	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	97.31
24	0.16	0.35	0.34	0.04	98.40	0.08	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	99.41
25	0.18	0.38	0.35	0.37	95.64	0.05	0.09	0.00	0.00	0.05	0.03	97.14
26	0.45	0.28	0.26	0.10	95.62	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	96.79
27	8.34	0.39	0.52	0.33	89.54	0.50	0.17	0.00	0.00	0.07	0.00	99.84
28	0.14	0.31	0.33	0.23	97.05	0.00	0.04	0.00	0.12	0.06	0.00	98.29
29	0.09	0.26	1.07	0.06	93.94	0.07	0.29	0.00	0.02	0.03	0.02	95.83
30	1.21	0.29	0.64	0.34	93.57	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	96.12
31	0.06	0.30	0.25	0.36	96.48	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	97.49
32	0.07	0.28	0.23	0.40	97.63	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.68

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

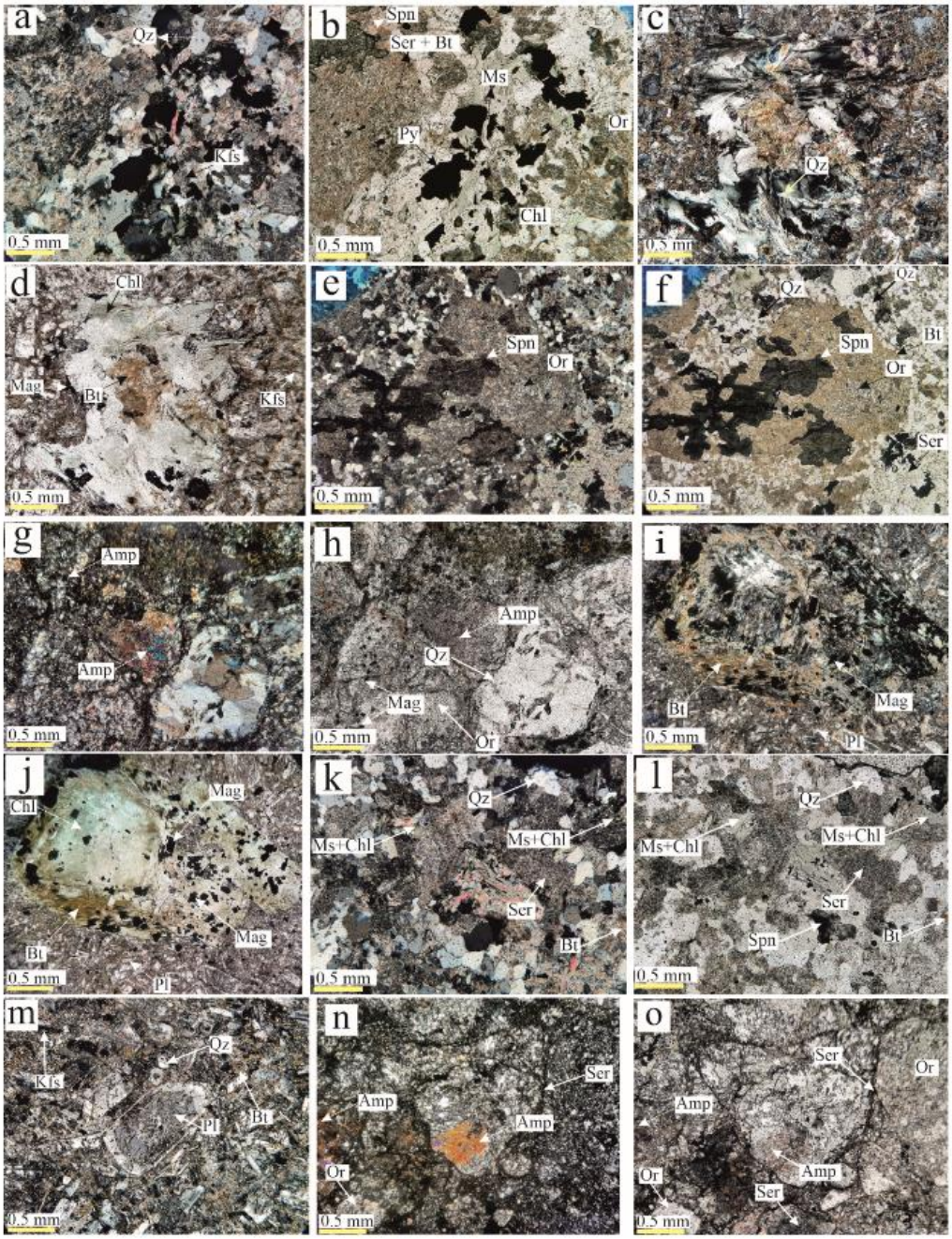
33	0.11	0.37	0.36	0.33	96.66	0.03	0.12	0.00	0.00	0.06	0.00	98.03
34	0.08	0.35	0.30	0.37	96.76	0.07	0.09	0.00	0.05	0.00	0.00	98.06
35	0.41	0.34	0.55	0.28	94.29	0.03	0.09	0.00	0.03	0.00	0.08	96.10
36	0.14	0.27	0.49	0.08	95.21	0.05	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00	96.32
37	0.09	0.28	0.16	0.18	96.73	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	97.51
38	0.11	0.33	0.11	0.18	96.93	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	97.72
39	0.05	0.24	0.51	0.15	96.72	0.03	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	97.78
40	0.11	0.31	0.36	0.22	96.57	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	97.75
Accuracy (wt%)	0.019	0.027	0.01	0.024	0.023		0.012					

بحث

سنگ‌نگاری

سنگ‌های غالب منطقه شامل گرانیت (شکل۲ ـ a، b، c، d، e، f، g، h، i، j، k، l، m، n، o) و گرانودیوریت (شکل ۳ـ a ، b، c، d) با ترکیب لوکوکرات و بافت پورفیری هستند؛ در گرانیت‌ها، کوارتز (۴۰–۴۵ درصد) (شکل ۲ـ a، c، f، l)، ارتوکلاز (۲۰–۲۵ درصد) (شکل ۲ـ b، e، h) و پلاژیوکلاز (۱۰–۱۵ درصد) (شکل ۲ـ g و m) کانی‌های اصلی را تشکیل می‌دهند، در حالی که در گرانودیوریت‌ها نسبت پلاژیوکلاز بیشتر (۳۰–۵۹ درصد) (شکل ۳- c) و کوارتز کمتر (۱۶–۴۳ درصد) است. فلدسپارهای قلیایی شامل ارتوکلاز، میکروکلین و بافت پرتیت در هر دو سنگ مشاهده می‌شوند، با این تفاوت که در گرانودیوریت‌ها ترکیب متنوع‌تری دارند. بلورهای کوارتز در هر دو نوع سنگ نیمه شکل‌دار با ساختار پر مانند هستند. پلاژیوکلازها اغلب منطقه‌بندی ترکیبی نشان می‌دهند؛ به‌ویژه در گرانودیوریت‌ها که از An_{50} تا An_{25} تغییر می‌کنند. در برخی موارد، پلاژیوکلازها توسط ارتوکلاز احاطه شده‌اند که نشان‌دهنده پتاسیم بالای ماگما است. ارتوکلازها معمولاً دارای ماکل کارلسباد و گاه بافت پرتیت هستند. بیوتیت و هورنبلند به‌عنوان کانی‌های فرومنیزین در هر دو سنگ حضور دارند، اما به دلیل شدت دگرسانی، اغلب به کلریت و سریسیت (شکل ۲ - b، e، h، k و شکل ۳ - a، c) تبدیل شده‌اند. در گرانیت‌ها، دو نسل بیوتیت تشخیص داده شده است: نسل اول نیمه شکل‌دار و کلریتی شده و نسل دوم بی‌شکل درون کلریت‌ها. در گرانودیوریت‌ها، نسبت بیوتیت به هورنبلند با کاهش کوارتز کاهش می‌یابد. کانی‌های فرعی در هر دو سنگ شامل اسفن، مگنتیت، پیریت، آپاتیت و زیرکن هستند. اسفن به‌صورت بلورهای درشت و دگرسان شده، مگنتیت به شکل ریزدانه و پراکنده و پیریت به‌صورت بی‌شکل در کوارتز و فلدسپارها دیده می‌شود. کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، سریسیت، کائولینیت، اپیدوت، هماتیت و کلسیت هستند که نشان‌دهنده دگرسانی گرمابی گسترده در هر دو نوع سنگ می‌باشند.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

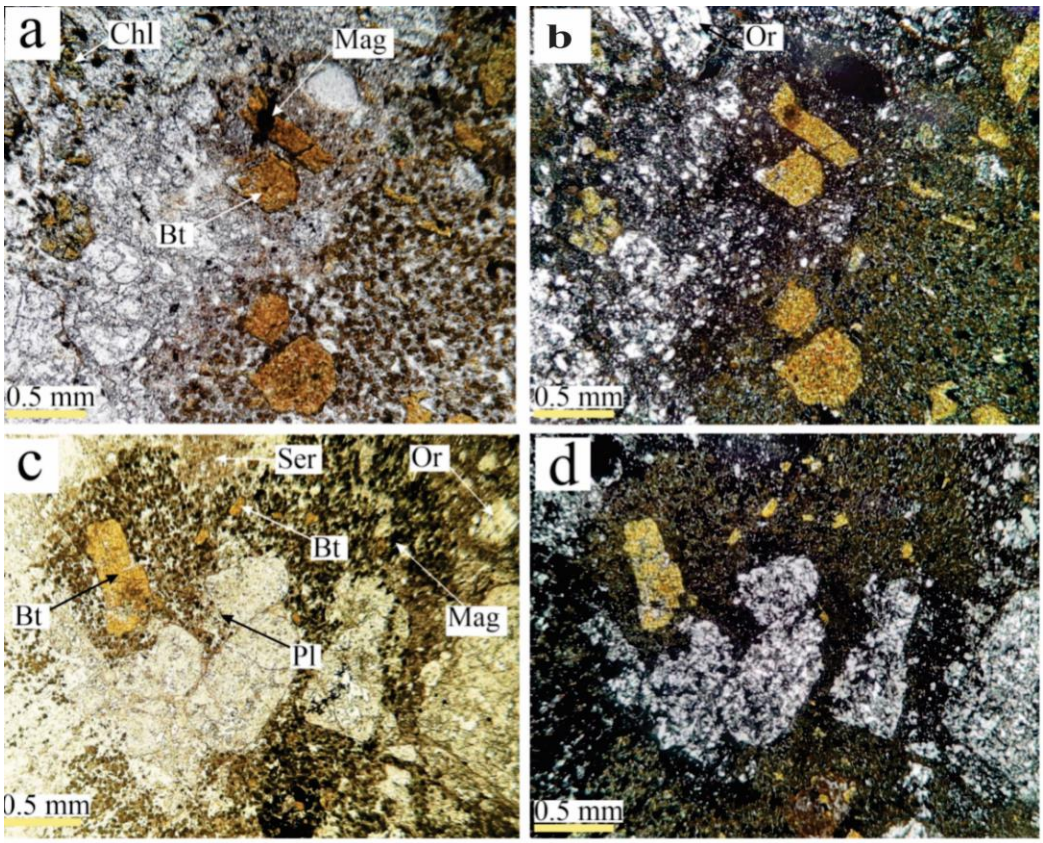


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سیلیکاتی گرانیت‌های کانسار میدوک: a و b) بلورهای کوارتز با ساختار پر مانند، دگرسانی ارتوکلاز به سریسیت، دگرسانی بیوتیت به کلریت، کانی‌های فرعی و بدون شکل اسفن و پیریت و بلورهای شکل‌دار مگنتیت (شاخص زون پتاسیک در سنگ گرانیت) (a: نور XPL و b: نور PPL)، c و d) بلورهای کوارتز با ساختار پر مانند، دگرسانی بیوتیت به کلریت، بلورهای ریز نیمه شکل‌دار مگنتیت، دگرسانی بالا فلدسپار پتاسیم به سریسیت (معرف زون پتاسیک در سنگ گرانیت) (c: نور XPL و d: نور PPL)، e و f: بلورهای ریز بدون شکل کوارتز، بلورهای خیلی کم بیوتیت، دگرسانی ارتوکلاز به سریسیت، کانی فرعی اسفن با برجستگی تقریباً بالا (e: نور XPL و f: نور PPL)، g و h) آمفیبول‌های دگرسان شده در یک نمونه گرانیت (g: نور XPL و H: نور PPL)، i و j) تشکیل بیوتیت ثانویه در حاشیه کلریت در نتیجه دگرسانی گرانیت‌ها (i: نور XPL و j: نور PPL)، k و l: دگرسانی فیلیک در گرانیت‌ها و تشکیل مسکوویت و کلریت (k: نور XPL و l: نور PPL)، m) منطقه بندی شیمیایی در بلور پلاژیوکلاز، دگرسانی تقریباً کامل ارتوکلاز به سریسیت (معرف زون فیلیک)

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

(نور XPL)،n و o) بلور شکل‌دار آمفیبول که به کلریت تجزیه شده‌اند، سریسیتی شدن ارتوکلازها (زون فیلیک) (N: نور XPL و o: نور PPL). اختصارات: Mag: مگنتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Or: ارتوکلاز، Bt: بیوتیت، Chl: کلریت، Ser: سریسیت، Spn: اسفن، Amp: آمفیبول، Qz: کوارتز، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Ms: مسکویت (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 2. Microscopic images of silicate minerals in Meiduk granites: a–b) Quartz with plumose texture, orthoclase altered to sericite, biotite replaced by chlorite, accessory sphene and pyrite, and euhedral magnetite crystals indicating potassic alteration (a: XPL, b: PPL); c–d) Quartz with plumose texture altered biotite to chlorite, subhedral magnetite, intense sericitization of K-feldspar (c: XPL, d: PPL); e–f) Aphanitic quartz, scarce biotite, orthoclase altered to sericite, high-relief sphene (e: XPL, f: PPL); g–h) Altered amphiboles in granite (g: XPL, h: PPL); I–J) Secondary biotite at chlorite margins due to granite alteration (i: XPL, j: PPL); k–l) Phyllic alteration with formation of muscovite and chlorite (k: XPL, l: PPL); m) Zoned plagioclase and sericitized orthoclase indicating phyllic zone (XPL); n–o) Euhedral altered amphibole and orthoclase altered to sericite (phyllic zone) (n: XPL, o: PPL). Abbreviations: Mag: Magnetite, Pl: Plagioclase, Or: Orthoclase, Bt: Biotite, Chl: Chlorite, Ser: Sericite, Spn: Sphene, Amp: Amphibole, Qz: Quartz, Kfs: K-feldspar, Ms: Muscovite (Whitney and Evans, 2010)



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سیلیکاتی گرانودیوریت‌های کانسار میدوک: زون پتاسیک؛ دگرسانی ارتوکلاز به سریسیت، بلورهای پراکنده‌ی بیوتیت ثانویه و مگنتیت، کانی رگه‌ای مگنتیت (شکل a و b)، جانشینی بیوتیت توسط پلاژیوکلاز؛ a) نور PPL، b) نور XPL، c) نور PPL، d) نور XPL. اختصارات: Mag: مگنتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Or: ارتوکلاز، Bt: بیوتیت، Chl: کلریت، Ser: سریسیت (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 3. Microscopic images of silicate minerals in Meiduk granodiorites: potassic zone; Sericitized orthoclase, dispersed secondary biotite and magnetite, magnetite veinlets (Figure a,b), and biotite replaced by plagioclase. a) PPL, b) XPL, c) PPL, d) XPL.Abbreviations: Mag: Magnetite, Pl: Plagioclase, Or: Orthoclase, Bt: Biotite, Chl: Chlorite, Ser: Sericite (Whitney and Evans, 2010)

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

دگرسانی و کانه‌زایی

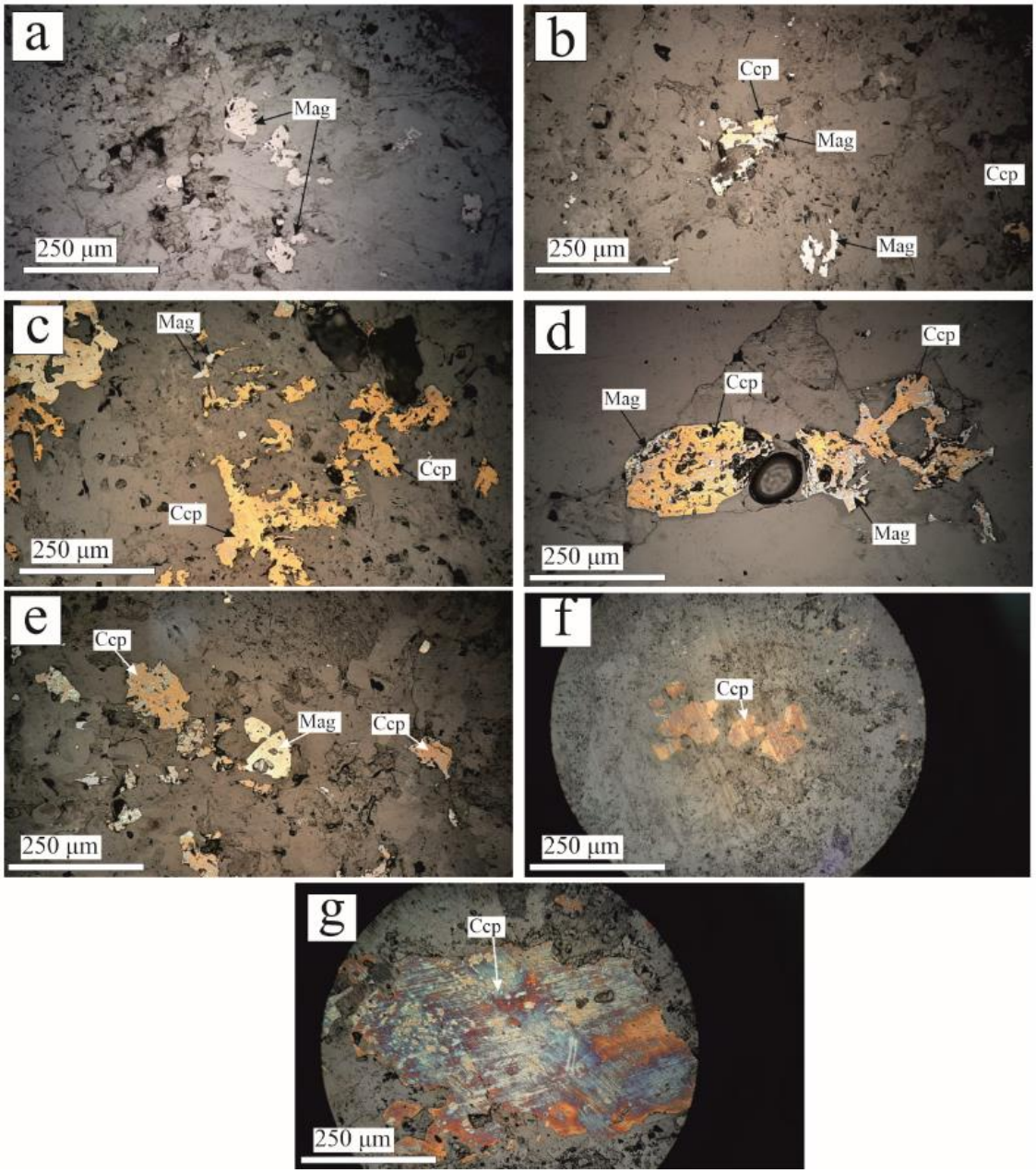
سیستم پورفیری میدوک با قطع شدن توسط مجموعه دایک‌های با روند شمال و شمال شرق و دگرسانی شدید پتاسیک مشخص می-گردند؛ در این منطقه زون پتاسیک با پراکندگی فلدسپار پتاسیم، کلریت و مگنتیت و برجای ماندن هورنبلند و پلاژیوکلازهایی که تا حدی به طور کامل توسط بیوتیت ماگمایی جایگزین شده‌اند؛ همچنین جایگزینی بیوتیت و هورنبلند با کلریت در دگرسانی پتاسیک مشاهده می‌شود (شکل ۳- c،b و شکل ۲- k، b، o). در دگرسانی فیلیک سریسیتی شدن شدید منجر به تبدیل گسترده فلدسپار و بیوتیت به سریسیت شده (شکل ۲- n ،k ،b) که تحت نفوذ رگه ـ رگچه‌های پیریت و کوارتز قرار گرفته‌اند.

به طور معمول سه ناحیه‌ی متمایز از کانه‌زایی مس را می‌توان در کانسار میدوک تشخیص داد که عبارت‌اند از: الف) زون کانه‌زایی هیپوژن ب) ناحیه‌ی غنی‌سازی سوپرژن ج) کلاهک ناحیه‌ی فروشست. براساس کانی‌شناسی و روابط برش متقاطع رگه – رگچه‌ها سه مرحله اصلی کانه‌زایی به شرح زیر خواهند بود:

۱. رگه‌های مرحله اولیه با مجموعه کوارتز ± فلدسپار پتاسیم ± پیریت ± مگنتیت همراه با دگرسانی پتاسیک دیده می‌شود.
۲. مرحله کانه‌زایی اصلی که عمدتاً در مناطق دگرسانی پتاسیک و دگرسانی فیلیک – پتاسیک توسعه یافته است؛ این مرحله با رگه‌های حاوی کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت ± کالکوسیت ± بورنیت ± مگنتیت مشخص می‌شود.
۳. رگه‌های مرحله آخر با کوارتز ± پیریت ± پیریت که اغلب در ناحیه دگرسانی فیلیک رخ داده‌اند مشخص می‌شوند.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]



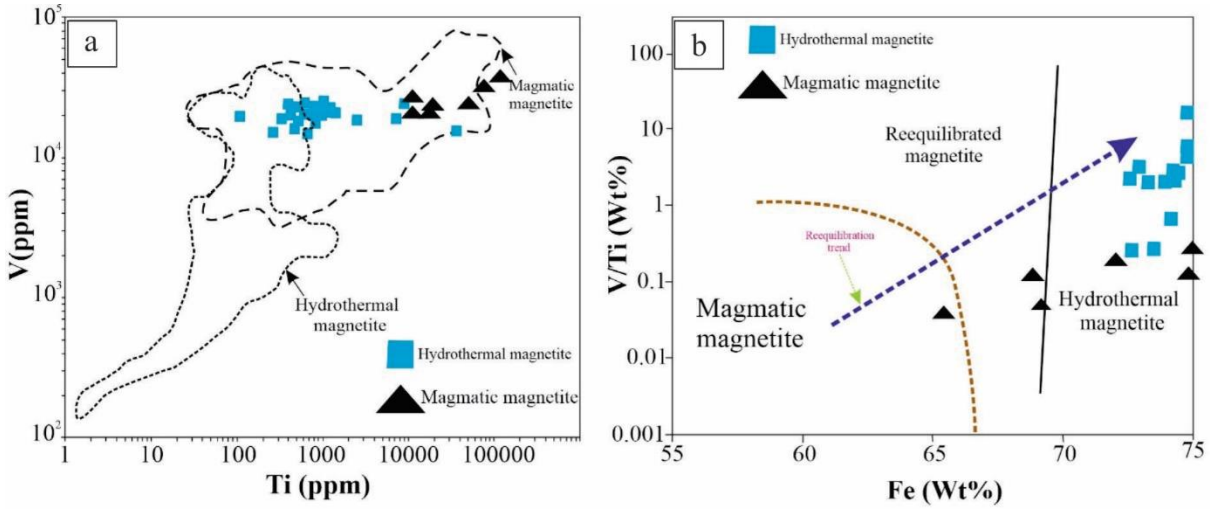
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ انعکاسی از کانه‌های فلزی کانسار میدوک: a) بلورهای پراکنده و نیمه شکل‌دار مگنتیت نسل دوم، b) رشد درهم پیریت و مگنتیت ثانویه، c) بلور بی‌شکل کالکوپیریت و کانه نسل دوم مگنتیت. d) رشد درهم مگنتیت نسل دوم با کالکوپیریت. E) بلور نیمه شکل دار مگنتیت نسل دوم و بلور بی‌شکل کالکوپیریت، f و g) بلور بی‌شکل کالکوپیریت. اختصارات: Ccp: کالکوپیریت، Mag: مگنتیت (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. Microscopic Reflection pictures of ore minerals in the Meiduk deposit: a) Dispersed subhedral second-generation magnetite;b) Intergrowth of pyrite and secondary magnetite; c) Anhedral chalcopyrite and second-generation magnetite;d) Intergrowth of magnetite and chalcopyrite; e) Subhedral second-generation magnetite and anhedral chalcopyrite;f–g) Anhedral chalcopyrite.Abbreviations: Ccp: Chalcopyrite, Mag: Magnetite (Whitney and Evans, 2010)

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

شیمی مگنتیت

مگنتیت از جمله کانی‌هایی به شمار می‌رود که تحت شرایط بسیار متنوعی از تبلور در حرارت بالا در ترکیبات سیلیکاته و فلزات سولفیدی تا سیالات گرمابی حرارت پایین ته‌نشست می‌یابد (Canil et al., 2016; Zhao et al., 2018; Wen et al., 2017). به دلیل جایگیری طیف بالایی از عناصر فرعی و نادر در مگنتیت، می‌توان از ترکیب عنصری مگنتیت جهت تفکیک و تمیز شرایط مختلف در بازه زمانی تشکیل مگنتیت بهره گرفت. همچنین، این کانی تحت شرایط مختلف مکانیکی و دگرسانی‌های شیمیایی مقاوم است، لذا ابزار مناسبی برای انجام پژوهش‌های سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی محسوب می‌گردد (Wen et al., 2017). عناصری نظیر Al, Ti, Mg, Mn, Zn, Cr, V, Ni و Co مهم‌ترین عنصر موجود در ساختار کانیایی مگنتیت را شامل می‌شوند (Carew, 2006; Rusk, 2009; Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll, 2015). در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب میزان(ppm) 0 =Ni، 0.22 (ppm) =V، 0.045 =Cr، 0.004 (ppm) =Zn، 1212.65 (wt%) =Mn، 0.04 =Mg، 73 =Fe، 2356 (wt%) =Al، 0.93 (ppm) =Ti، 0.006 (ppm) =Co (wt%) می‌باشد. وانادیم به خاطر شرایط ترمودینامیکی خود در مگنتیت به صورت V^{3+}، V^{4+} و V^{5+} حضور دارد. به دلیل یکسانی شعاع یونی که با Fe^{3+} دارد در ساختار مگنتیت از فراوانی بیشتری برخوردار است (Balan et al., 2006). غلظت وانادیم در مگنتیت وابسته به دما و fO_2 است. اختلاط وانادیم در مگنتیت توسط دما، در دمای بالا کنترل می‌شود، ولی در دماهای پایین در شرایط پیچیده‌تری اختلاط وانادیم در مگنتیت را کنترل fO_2 می‌کند (Wu et al., 2019). براساس میزان وانادیم و تیتانیوم موجود در ترکیب مگنتیت‌های میدوک (شکل ۵ - a)، نمونه‌های انالیز شده در محدوده مگنتیت‌های ماگمایی ـ گرمابی قرار گرفته است. همچنین براساس نمودار آهن در مقابل V/Ti (شکل ۵-b) عمده مگنتیت‌های مورد مطالعه در محدوده گرمابی قرار گرفته و تنها دو نمونه در محدوده‌ی تعادل مجدد یافته و یک نمونه در محدوده‌ی مگنتیت‌های ماگمایی قرار دارد که این نشان دهنده‌ی نقش آفرینی سیالات گرمابی در شکل‌گیری مگنتیت‌های مورد مطالعه است.



شکل۵- a) نمودار Ti در مقابل V که به منظور تمایز مگنتیت‌های ماگمایی و گرمابی در کانسار میدوک استفاده شده است (Nadoll et al., 2015)، b) نمودار Fe در مقابل V/Ti به منظور تفکیک مگنتیت‌های ماگمایی، تعادل مجدد یافته و گرمابی (Wen et al., 2017)

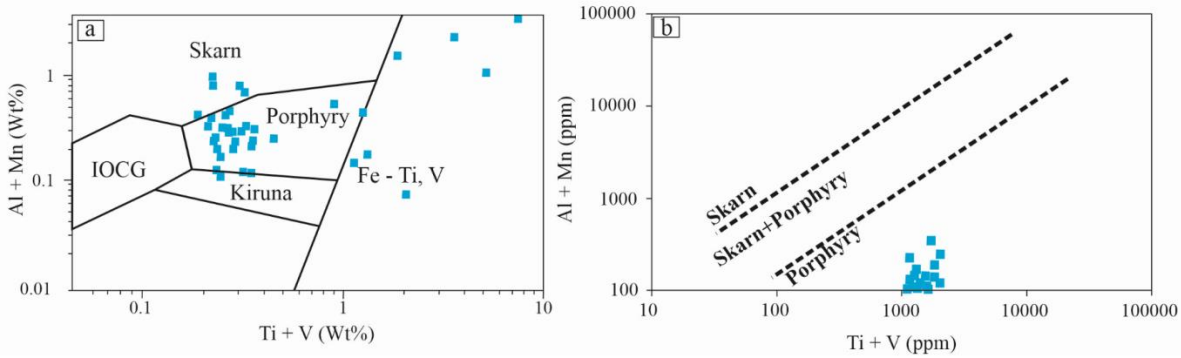
Fig. 5. a) Ti vs. V diagram distinct magmatic and hydrothermal magnetites from the Meiduk deposit (Nadoll et al., 2015); b) Fe vs. V/Ti diagram used to classify magmatic, re-equilibrated, and hydrothermal magnetites (Wen et al., 2017)

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

زایش مگنتیت در کانسار پورفیری میدوک

تفکیک زایش ذخایر با استفاده از شیمی مگنتیت

از نمودارهای موجود در شکل ۶ که عناصر Al+Mn در مقابل Ti+V می‌باشند می‌توان برای تفکیک کانسارهای IOCG، مس پورفیری، آهن نواری، اسکارن Fe-Ti و کانه‌زایی‌های V استفاده کرد (Nadoll, 2015; Wen, 2017). این نمودارها که براساس شیمی مگنتیت طراحی شده‌اند، ابزاری ارزشمند برای تحلیل فرآیندهای ژئوشیمیایی و ماگمایی در مناطق دارایی کانه‌زای فلزی است. این نمودار به‌ویژه برای پیش‌بینی ویژگی‌های ژئوشیمیایی مهم مانند ترکیب ماگمایی، شرایط دما و فشار در فرآیندهای تبلور، و فرآیندهای دگرگونی و کانی‌سازی مفید است. تغییرات در نسبت عناصر Ti و V، به‌ویژه در ذخایر پورفیری، می‌تواند نشان‌دهنده ماگماهای غنی از این عناصر باشد که معمولاً در سنگ‌های آذرین مافیک و ماگماهای با دمای بالا مشاهده می‌شوند (Wen et al., 2017). علاوه بر این، این نمودارها به شبیه‌سازی شرایط تشکیل مگنتیت و پیش‌بینی پتانسیل‌های معدنی کمک می‌کند، به‌ویژه در مناطق کانی‌سازی مس و مولیبدن که در سیستم‌های پورفیری رایج هستند (Yang and Cooke, 2019). همچنین، تحلیل این نمودار می‌تواند به فهم بهتر روابط بین فرآیندهای ماگماتیسم و تشکیل سیستم‌های پورفیری و تأثیر آن‌ها بر تشکیل کانه‌های فلزی کمک کند. در این رابطه، مگنتیت در ذخایر اسکارنی از Al+Mn بالا و Ti+V پایینی برخوردار است؛ در حالی که در کانسارهای پورفیری، محتوای Ti+V بالا و میزان Al+Mn پایین است (Nadoll, 2015). قرارگیری نمونه‌ها بر روی نمودار Al+Mn در مقابل Ti+V (Wen, 2017) (شکل ۶- a و b) نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های مگنتیت مورد مطالعه در هر دو نمودار در بخش پورفیری قرار می‌گیرند.



شکل ۶- a) موقعیت نمونه‌های مگنتیت کانسار میدوک بر روی نمودار Al + Mn در برابر Ti + V (Nadoll et al., 2015)، b) وضعیت قرارگیری نمونه‌های شیمی کانی مگنتیت کانسار میدوک Al + Mn در برابر Ti + V (Nadoll et al., 2014)

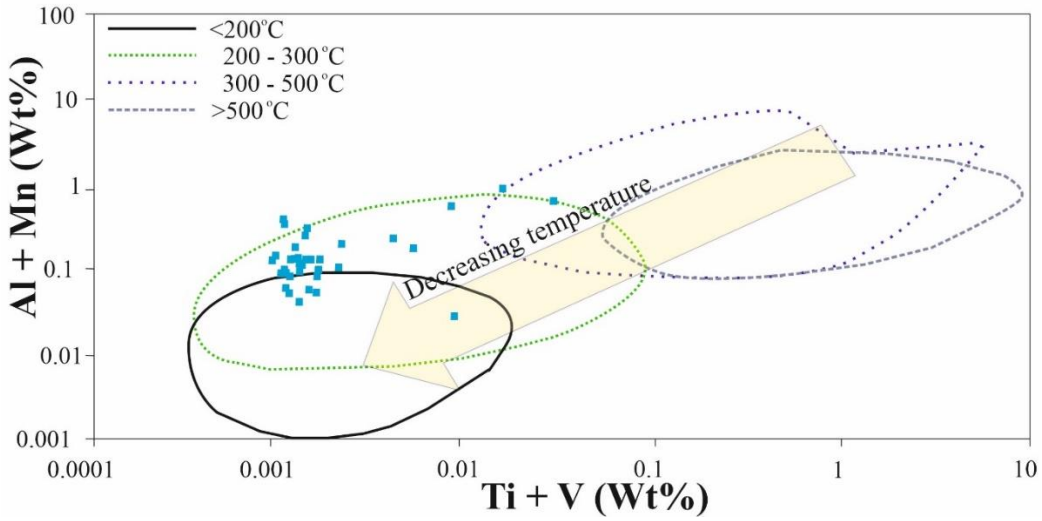
Fig. 6. a) Al+Mn vs. Ti+V diagram showing the classification of Meiduk magnetite samples (Nadoll et al., 2015); b) Al+Mn vs. Ti+V plot indicating the geochemical affinity of magnetites with porphyry systems (Nadoll et al., 2014)

شرایط فیزیکو شیمیایی کانه‌زایی

مطالعات هاگارتی (Haggerty, 2019)، ژائو و همکاران (Zhao et al., 2018) و مولو و همکاران (Mollo et al., 2013) نشان دادند که شیمی مگنتیت توسط شاخص‌هایی نظیر فوگاسیته اکسیژن و سولفور، دما، فشار، نسبت سرد شدن و شیمی سیال کنترل می‌شود. بنابراین می‌توان از شیمی مگنتیت به منظور تفکیک سیستم‌های کانه زا از غیرکانه‌زا استفاده نمود (Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll, 2014). دما در فرآیندهای گرمابی کانسارهای پورفیری بسیار مهم است و در بسیاری از مطالعات، دما به‌عنوان یک عامل کلیدی در تغییر ترکیب و فازهای کانی‌ها در نظر گرفته شده است (Hedenquist et al., 1998). در دماهای پایین‌تر (۲۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)،

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

مگنتیت به‌عنوان یکی از مراحل اولیه در فرآیندهای گرمابی تشکیل می‌شود. در حالی که در دماهای بالاتر، تشکیل ترکیبات آهنی دیگر مانند هماتیت غالب می‌شود که این امر ممکن است منجر به کاهش غلظت فلزات با ارزش در برخی مناطق شود (Sillitoe, 2010). با توجه به مطالعات تیان و همکاران (Tian et al., 2021) علاوه بر محاسبه‌ی فوگاسیته‌ی اکسیژن با استفاده از شیمی مگنتیت می‌توان تغییرات دمایی در هنگام تشکیل مگنتیت را نیز محاسبه نمود؛ در سیستم‌های پورفیری - اپی ترمال، کاهش دما منجر به تشکیل ترکیبات خاصی از Ti، Al، Mn و V می‌شود، به عنوان مثال کاهش دما ممکن است موجب کاهش حلالیت عناصر در محلول‌های آب و شروع فرایند کانه‌زایی گردد (Deditius et al., 2018)، بر همین اساس با استفاده از نمودار Al+Mn در برابر Ti+V موجود در مگنتیت که توسط دیدیتیوس و همکاران (Deditius et al., 2018) (شکل ۷) ارائه شده است نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی دمایی ۲۰۰ – ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و همچنین از یک روند افت دمایی پیروی می‌نمایند. با توجه به مطالعه‌ی سیلیتو (Sillitoe, 2010) در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد روند افت دمایی می‌تواند موجب تشکیل کانی‌های مختلفی مانند مگنتیت، کوارتز و کانی‌های سولفیدی گردد (Sillitoe, 2010)، براساس مطالعات زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2018)، از دیدگاه کانه‌زایی ویژگی افت دمایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد به این دلیل که طی فرایند افت دما گوگرد سولفاته به سولفید تبدیل شده و در نتیجه یکی از عوامل مهم در شروع کانه‌زایی سولفیدی است.



شکل ۷- تعیین دمای تشکیل مگنتیت‌های میدوک با استفاده از شیمی کانی مگنتیت بر روی نمودار Al+Mn در برابر Ti+V (Deditius et al., 2018)

Fig. 7. Al+Mn vs. Ti+V diagram used to estimate crystallization temperature of magnetite (Deditius et al., 2018)

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با تمرکز بر شیمی کانی مگنتیت در کانسار پورفیری مس - مولیبدن میدوک نشان می‌دهد که این کانی نه تنها درک عمیقی از فرآیندهای ماگمایی و گرمابی ارائه می‌دهد، بلکه ابزار مؤثری برای تحلیل شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر کانه‌زایی نیز محسوب می‌شود. تحلیل‌های انجام‌شده براساس داده‌های EPMA و تفسیر نمودارهای چندگانه، حاکی از آن است که بخش عمده مگنتیت‌های مورد بررسی منشأ گرمابی داشته و در مراحل میانی تا پایانی فعالیت هیدروترمالی تشکیل شده‌اند.

پراکندگی عناصر کمیاب مانند Ti، V، Al و Mn در مگنتیت‌های میدوک به‌وضوح بیانگر زایش آن‌ها در یک محیط گرمابی با دمای نسبتاً پایین (در بازه ۲۰۰–۳۰۰ درجه

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]
[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

سانتی‌گراد) و فوگاسیته اکسیژن رو به کاهش است. این شرایط، با محیط احیایی هم‌خوانی دارد که می‌تواند زمینه‌ساز آزادسازی و ته‌نشینی عناصر فلزی از سیالات کانه‌زا، به‌ویژه مس و گوگرد، و تشکیل کانی‌های سولفیدی باشد. این یافته با حضور گسترده رگه‌های کالکوپیریت، بورنیت و پیریت در مراحل مختلف کانه‌زایی میدوک هم راستا است.

از سوی دیگر، تمایز شیمیایی مشخص بین مگنتیت‌های با منشأ ماگمایی و گرمابی در نمودارهای Al+Mn در برابر Ti+V و همچنین V/Ti، علاوه بر تأیید منشأ گرمابی اغلب نمونه‌ها، نشان‌دهنده تطابق مطلوب با مشخصه‌های زایش در ذخایر پورفیری است. همچنین، افزایش نسبت Ti و V نسبت به Al و Mn شاخص مهمی برای تشخیص محیط کانه‌زای پورفیری در این مطالعه محسوب می‌شود.

References

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., MoniÉ, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Geological Magazine 148, 692-725.

Alavi, M., 2004. Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and its Proforeland Evolution. American Journal of Science January 304.

Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. American Journal of Science - American Jornal of Scince 307, 1064-1095.

Arabzadeh Bani Asadi, M., Ghasemi, H., Angiboust, S., Rezaei Kahkhaei, M., Lambrini, P., 2023. Chemical composition of biotite in the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock, Baft, Kerman: Evidence for tectonic setting and physicochemical conditions of magma emplacement and crystallization. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9, 197–224.

Asadi, S., Moore, F., 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.

Balan, E., De Villiers, J.P.R., Eeckhout, S.G., Glatzel, P., Toplis, M.J., Fritsch, E., Allard, T., Galoisy, L., Calas, G., 2006. The oxidation state of vanadium in titanomagnetite from layered basic intrusions. American Mineralogist 91, 953-956.

Barens, S.J., Roeder, P.L., 2001. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks. Journal of Petrology 42, 2279-2302.

Berberian, F., Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. American Geophysical Union. Geodynamic Series 3, 5-33.

Carew, M., Mark, G., Oliver, N., Pearson, N., 2006. Trace element geochemistry of magnetite and pyrite in Fe oxide (+/-Cu-Au) mineralized systems: Insights into the geochemistry of ore-forming fluid. Geochimica Et Cosmochimica Acta - Geochimica et Cosmochimica Acta 70.

Canil, D., Grondah, C., Lacourse, T., Pisiak, L.K., 2016. Trace elements in magnetite from porphyry Cu–Mo–Au deposits in British Columbia, Canada. Ore Geology Reviews 72,1116–1128

Cooke, D.R., Baker, M., Hollings, P., Sweet, G., Chang, Z., Danyushevsky, L., Gilbert, S., Zhou, T., White, N.C., Gemmell, J.B., Inglis, S., 2014. New advances in detecting the distal geochemical footprints of porphyry systems—Epidote mineral chemistry as a tool for vectoring and fertility assessments. In: Kelley, K.D., Golden, H.C. (Eds.), Building Exploration Capability for the 21st Century. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, SpeciL Publication 18, 127–152.

Dare, S.A.S., Barnes, S.-J., Beaudoin, G., Méric, J., Boutroy, E., Potvin-Doucet, C., 2014. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. Mineralium Deposita 49, 785-796.

Davodi, A., Ahmadi Khalaji, A., Keshtgar, S., Eskandarnia, P., Tahmasbi, Z., 2025. Geochemistry and petrogenesis of the granitoid rocks in Mahiroud volcano–plutonic complex; southeast of Sarbisheh (eastern Iran). New Findings in Applied Geology 19.

Deditius, A.P., Reich, M., Simon, A.C., Suvorova, A., Knipping, J., Roberts, M.P., Rubanov, S., Dodd, A.,

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

Saunders, M., 2018. Nanogeochemistry of hydrothermal magnetite. Contributions to Mineralogy and Petrology 173, 46.

Dewey, J.F., Pitman, W.C., Iii, Ryan, W.B.F., Bonnin, J., 1973. Plate Tectonics and the Evolution of the Alpine System. Geological Society of America Bulletin 84, 3137-3180.

Dupuis, C., Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. Mineralium Deposita 46, 319-335.

Eskandarnia, P., Saki, A., Rezaei, M., Miri, M.M., 2020. Fertility of olivine–gabbronorites of Cheshmeh Ghassaban (northeast of Alvand complex) using index elements in olivine and pyroxene minerals. In: Second National Conference on Knowledge-Based Research in Earth Sciences, Ahvaz. Sivilica Press.

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

Ghorbani, M., Nasiri Bezenjani, R., 2011. Slab partial melts from the metasomatizing agent to adakite, Tafresh Eocene volcanic rocks, Iran. Island Arc 20, 188-202.

Grigsby, J.D., 1990. Detrital magnetite as a provenance indicator. Journal of Sedimentary Research 60, 940-951.

Haggerty, S., 2019. Oxide mineralogy of the upper mantle. pp. 355-416.

Hassanzadeh, J., 1993. Metalogenic and tectonomagmatic events in SE sector of the cenozoic active continental mar n of central Iran (Shahre-Babak, Kerman Province). California, Los Angeles.

Hedenquist, J.W., Arribas, A., Jr., Reynolds, T.J. 1998. Evoluton of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. Economic Geology 93, 373-404

Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: Geochemical and geodynamic implications. Journal of Asian Earth Sciences 30, 433-447.

Karimi Shahraki, B., Ghasemi Siani, M., Gholizadeh, K., 2019. Fe–Ti oxide minerals geothermometry and oxygen fugacity at the Dar Gaz anomaly, Kahnuj. Kharazmi Journal of Earth Sciences 5, 79–98.

McInnes, B., Evans, N., Belousova, E., Griffin, W.T., Andrew, R.L., 2003. Timing of mineralization and exhumation processes at the Sar Cheshmeh and Meiduk porphyry Cu deposits, Kerman belt, Iran. Mineral Exploration and Sustainable Development, 1197-1200.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S., 2005. World skarn deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, 299-336.

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.

Mohammaddoost H, Ghaderi M, Kumar TV, Hassanzadeh J, Alirezaei S (2017) Zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology, with S isotopic composition of sulfdes from the Chah-Firouzeh porphyry Cu deposit, Kerman Cenozoic arc, SE Iran. Ore Geology Reviews 88, 384–399

Mollo, S., Putirka, K., Iezzi, G., Scarlato, P., 2013. The control of cooling rate on titanomagnetite composition: implications for a geospeedometry model applicable to alkaline rocks from Mt. Etna volcano. Contributions to Mineralogy and Petrology 165, 457-475.

Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D., Walshe, J., 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. Ore Geology Reviews 61, 1-32.

Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., Koenig, A.E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. Mineralium Deposita 50, 493-515.

Parandoush, K., Atapour, H. Riseh, M. A. 2019. Geochemical signatures of waste rocks around Sarcheshmeh porphyry copper mine dumps, southeastern Iran: Implications for exploration, economic by-products and the environment. Journal of Geochemical Exploration 199, 31-52.

Pisiak, L., Canil, D., Grondahl, C., Plouffe, A., Ferbey, T., Anderson, R.G., 2014. Magnetite as a porphyry Cu indicator mineral in till: a test using the Mount Polley porphyry Cu-Au deposit. British Columbia, Geoscience B.C. Report 2015-1, 141-149.

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.

Rusk, B., Oliver, N., Brown, A., Lilly, R., Jungmann, D., 2009. Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia; comparisons to IOCG deposits. In: Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 10th Biennial SGA

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

Meeting, Townsville, Australia, 2009, Proceedings, 656–658.

Saki, A., Miri, M.M., Eskandarnia, P., Rezaei, M., Dorani, M., 2020. Petrogenesis of olivine gabbronorites from Cheshmeh-Ghassaban area (NW of Hamedan) using mineral chemistry. Petrological Journal 10, 45–66.

Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. Mineralium Deposita 44, 265-283.

Shafiei, B., Shahabpour, J., 2008. Gold Distribution in Porphyry Copper Deposits of Kerman Region, Southeastern Iran. Journal of Sciences Islamic Republic of Iran 19, 247-260.

Shen, P., Pan, H., Zhou, T., Wang, J., 2014. Petrography, geochemistry and geochronology of the host porphyries and associated alteration at the Tuwu Cu deposit, NW China: a case for increased depositional efficiency by reaction with mafic hostrock? Mineralium Deposita 49, 709-731.

Sillitoe, R., 2010. Porphyry Copper Systems. Economic Geology 105, 3-41.

Simon, A.C., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Mengason, M., Englander, L., 2008. The effect of crystal-melt partitioning on the budgets of Cu, Au, and Ag. American Mineralogist 93, 1437 - 1448.

Sinclair, W., 2007. Porphyry deposits. pp. 223-243.

Singoyi, B., Danyushevsky, L., Davidson, G., Large, R., Zaw, K., 2006. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA-ICP-MS technique. Abstracts of Oral and Poster Presentations from the SEG 2006 Conference, 367-368.

Taghipour, N., 2007. The application of fluid inclusions and isotope geochemistry as guides for exploration, alteration and mineralization at the Meiduk porphyry copper deposit, Shahr-Babak, Kerman. Shaheed Bahonar University (Kerman), Iran.

Tale Fazel, E., 2023. Ilvaite trace mineral chemistry as a thermodynamic recorder of retrograde alteration and metallogenic indicator for discrimination of skarn deposits: an example from the iron deposit in north Sanandaj–Sirjan Zone. Journal of Earth Sciences 9, 283–307.

Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G., Emil Berador, A., 2021. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: Perspective from the giant Cretaceous Atlas porphyry Cu–Au deposit (Cebu, Philippines). Ore Geology Reviews 133, 104084.

Wang, M., Gutzmer, J., Michalak, P.P., Guo, X., Xiao, F., Wang, W., Liu, K., 2014. PGE geochemistry of the Fengshan porphyry–skarn Cu–Mo deposit, Hubei Province, Eastern China. Ore Geology Reviews 56, 1-12.

Wen, G., Li, J.-W., Hofstra, A., Koenig, A., Lowers, H., Adams, D., 2017. Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton. Geochimica et Cosmochimica Acta 213.

Whalen, J.B., Chappell, B.W., 1988. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan fold belt, Southeast Australia. American Mineralogist 73, 281-296.

Whitney, D., Evans, B., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist 95, 185-187.

Wu, C., Chen, H., Hong, W., Li, D., Liang, P., Fang, J., Zhang, L., Lai, C., 2019. Magnetite chemistry and implications for the magmatic-hydrothermal ore-forming process: An example from the Devonian Yuleken porphyry Cu system, NW China. Chemical Geology 522, 1-15.

Yang, Z. and Cooke, D. R., 2019. Chapter 5 Porphyry Copper Deposits in China. In: Chang, Z. and Goldfarb, R. J. (eds.) Mineral Deposits of China. Society of Economic Geologists.

Yang, Z., Hou, Z., White, N.C., Chang, Z., Li, Z., Song, Y., 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper–molybdenum deposit at Qulong, Tibet. Ore Geology Reviews 36, 133-159.

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Pourkaseb, H., Asadi, S., Saed, M., Lentz, D.R., 2018. Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfides of mineralized porphyry copper systems, UrumiehDokhtar magmatic arc, Iran. Geochimica et Cosmochimica Acta, 223: 36–59.

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Taheri, M., Asadi, S., Heidari, M., 2023. Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran: A record of deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems. Journal of Geochemical Exploration 249, 107213.

Zhao, L., Chen, H., Zhang, L., Li, D., Zhang, W., Wang, C., Yang, J., Yan, X., 2018. Magnetite geochemistry of the

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]

Fe–Cu deposits in NW China. Ore Geology Reviews 100, 422-440.

Heijianshan Fe–Cu (–Au) deposit in Eastern Tianshan: Metallogenic implications for submarine volcanic-hosted

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-10-29]

[DOI: 10.22034/KJES.2025.11.1.104462]