Vol. 9, No. 1, Spring and Summer 2023, pp. 283 - 307 ISSN (Print): 2538-449X ISSN(Online): 2981-1619

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

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

Ebrahim Tale Fazel[1]*

1. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Article info

Article history
Received: 26 June 2023
Accepted: 11 August 2023

Keywords:
Ilvaite, Fe skarn, electron microprobe analysis, North Sanandaj-Sirjan Zone.

Abstract

Ilvaite, $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$, is one of the important trace minerals in the retrograde alteration stage of skarn deposits. In this contribution, by using microscopic evidence, X-ray diffraction (XRD) and electron microprobe analysis (EPMA), the crystallographic characteristics, crystal chemistry and thermodynamic conditions of ilvaite have been investigated in the formation of skarn deposits. The Gholamabad iron skarn deposit (1.3 Mt with an average grade of 37.2% FeO) is located 30 km SW of Dehgolan, North Sanandaj-Sirjan Zone (N-SaSZ). Skarn formation has occurred in this deposit at the contact of alkali granite porphyry (Upper Jurassic) and tuffaceous siltstone sequence (Triassic-Jurassic), which was accompanied by progressive alteration of brown andradite-hedenbergite near the intrusive body and retrograde alteration of epidote-actinolite-calcite in the vicinity of volcanic rocks. Ilvaite with empirical formula, $Ca_{0.90}Fe^{2+}_{1.88}Fe^{3+}_{0.98}Al_{0.04}Mn_{0.04}Mg_{0.02}Si_{2.14}O_8(OH)$, formed from the reaction of andradite, magnetite, and quartz minerals during retrograde alteration stage (temperature 400 to 470 °C and $\Delta\log fO_2$(HM) between -4.2 and -4.0). Then, in the final stage of retrograde alteration, with increasing X_{CO2} activity (0.05 to 0.005) and decreasing oxygen content ($\Delta\log fO_2$(HM) < -4.5), ilvaite has been decomposed to the magnetite, calcite, and ferroactinolite assemblage at temperature 270 to 350 °C. According to the results of EPMA, the high ratio of Fe^{2+}/ Fe^{3+} (avg.= 1.90) and low content of Mn^{2+} (<0.05 assumed six cation sum) in the ilvaite of Gholamabad deposit indicates that it belongs to Fe skarn deposits, which is different from other skarn systems. In general, although ilvaite is a trace mineral in most skarn systems, the results of this approach show that the composition and thermodynamics of ilvaite can be used to distinguish different types of skarn deposits and the evolution of geochemical-skarnification processes.

Introduction

Ilvaite—a mixed-valence calcium and iron silicate with a general formula $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ has previously been described as a retrograde mineral in several Zn-Pb and Fe skarn deposits as well as in one Sn-W-F (Be) skarn (Einaudi et al., 1981; Franchini et al., 2002). Trace element composition of ilvaite is sensitive to physicochemical parameters of magmas such

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.101355
***Corresponding author:** Ebrahim Tale Fazel; **E-mail:** e.talefazel@basu.ac.ir
How to cite this article: 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. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(1), 283- 307.
http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.101355

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

as temperature, oxygen fugacity, water content, and melt composition, and can therefore be a robust tool in petrogenetic and metallogenic studies of skarn systems (Meinert, 1987; 1992). The Mn-rich species occur exclusively in marble hosted distal Zn-(Pb) skarn deposits, whereas the Fe-rich species occur in Fe, Au, Sn and W skarn deposits (Pesquera and Velasco, 1986; Miao et al., 2019; Wang et al., 2023). The Gholamabad iron skarn deposit (1.3 Mt with an average grade of 37.2% FeO) is located 30 km SW of Dehgolan, North Sanandaj-Sirjan Zone (N-SaSZ).

This study documents the occurrence of ilvaite from the Gholamabad Fe skarn deposit, and elucidates the physicochemical conditions of its formation and evolution. In this contribution, by using microscopic evidence, X-ray diffraction (XRD) and electron microprobe analysis (EPMA), the crystallographic characteristics, crystal chemistry and thermodynamic conditions of ilvaite have been investigated in the formation of skarn deposits.

Materials and Methods

About 35 samples were collected from different areas and subjected to petrographic studies. Mineralogical studies of ilvaite were first performed by ZEISS Axioplan 2 transmission-reflection light microscope. Then, to ensure the presence of this mineral, three samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and CuKα_1 primary beam (λ=1.54059 Å), 40 kV power and 35 mA current in the Salamanca (Spain). In order to identify the chemical composition and textural characteristics, about 20 points of the ilvaite mineral were subjected to electron microanalysis (EPMA) along with backscattered electron images (BSE) at the Novosibirsk Institute of Geology and Mineralogy (Russia). This analysis was performed by Cameca SX100 electron microscope technology with a current of 34 nA, an accelerating voltage of 20 kV, an electron beam diameter of of 5 microns, and a counting time of 20 seconds.

Results and Discussion

Local geological findings revealed that the Gholamabad iron deposit consists of three main rock units: (1) limestone sequence with volcanic interlayers known as tuffaceous siltstone (Triassic-Jurassic), (2) leucogranite mass (Upper Jurassic), and (3) magnetite layers with calc-silicate skarn (Sartipi, 2005). Granitoids of the area known as the Bolbanabad granite consist of alkaline leucogranites with pink color and porphyry-granular texture along with limited outcrops of mafic rocks (Azizi et al., 2011; Yajam and Ghalamghash, 2019). The alkali granite and syenogranite porphyry consist of quartz, granophyric orthoclase and plagioclase with rare minerals zircon, titanite, magnetite, and ilmenite. Skarn formation has occurred in this deposit at the contact of alkali granite porphyry (Upper Jurassic) and tuffaceous siltstone sequence (Triassic-Jurassic), which was accompanied by progressive alteration of brown andradite-hedenbergite near the intrusive body and retrograde alteration of epidote-actinolite-calcite in the vicinity of volcanic rocks. Ilvaite with empirical formula, $Ca_{0.90}Fe^{2+}_{1.88}Fe^{3+}_{0.98}Al_{0.04}Mn_{0.04}Mg_{0.02}Si_{2.14}O_8(OH)$, formed from the reaction of andradite, magnetite, and quartz minerals during the retrograde alteration stage (temperature 400 to 470 °C and $\Delta\log fO_2$(HM) between -4.2 and -4.0).

Conclusions

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

Although ilvaite is a relatively rare mineral, its complex formula and its compositional variability make it a potentially valuable indicator of the geochemical environment of skarn systems. This contribution revealed that there are systematic variations in ilvaite composition among skarn affinities. Ilvaite from the Gholamabad Fe skarn is similar in composition to ilvaite from Au skarns and suggests similar conditions of formation for both skarn types. The high content of FeO (avg.= 52.51 wt%) and high Fe^{+2}/Fe^{+3} ratio (avg.= 1.90) in the composition of the Gholamabad ilvaite implies high Fe activity and low fO_2, which is similar to associated intrusive rocks. Ilvaite from Fe and Au skarns also contains more Fe and less Mn than ilvaite from Zn-Pb skarns, which probably formed under higher fO_2 conditions. The higher amounts of Al_2O_3 and TiO_2, as well as the presence of F and Sn, clearly distinguish ilvaite from the Sn skarn from other skarn systems.

References

Azizi, H., Asahara, Y., Mehrabi, B., Chung, S. L., 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of high-K granite from the Suffiabad area, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. Chemie der Erde. 71 (6), 363-376.

Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. Economic Geology 75th anniversary, 317–391.

Franchini, M.B., Meinert, L.D., Valles, J.M., 2002. First occurrence of ilvaite in a gold skarn deposit. Economic Geology. 97 (5), 1119-1126.

Meinert, L.D., 1987. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central Mining district, New Mexico. Economic Geology. 82 (6), 523–545.

Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada. 19 (5), 145–162.

Miao, Y., Dick, J.M., Jing-wen, M., Cheng-you, F., Bin, L., An-huai, L., Yong-feng, Z., Jian-qing, L. 2019. Ilvaite as a thermodynamic recorder of multistage retrograde alteration in large Galinge skarn Fe deposit, western China. Journal of Central South University, 26 (12), 3534-3550.

Pesquera, A., Velasco, F, 1986. An occurrence of ilvaite layers in the Cinco Villas metasomatic rocks, Western Pyrenees (Spain). Mineralogical Magazine. 50 (3), 653-656.

Sartipi, H., 2005. Geology Map of Sanandaj. Scale 1/100000. Geology Survey of Iran, Iran.

Wang, Y.S., 1994. Analysis on special case of ilvaite enrichment in a certain iron deposit. Qinghai Geology. 3 (2), 19−20.

Yajam, S., Ghalamghash, J., 2019. A-type Granites of North Sanandaj-Sirjan zone, new observation, new classification. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 24 (8), 221-230. (in Persian)

CRediT authorship contribution statement

Ebrahim Tale Fazel

Writing - Review & Editing, Conceptualization
Validation, Methodology, Investigation
Resources

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۲۸۳ تا ۳۰۷ شاپا چاپی: ۲۵۳۸ -۴۴۹x شاپا الکترونیکی: ۱۶۱۹-۲۹۸۱

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد
مجله علوم زمین خوارزمی
Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

شیمی کانی کمیاب ایلویت به عنوان ثبت‌کننده شرایط ترمودینامیکی دگرسانی پسرونده و شاخص فلززایی در تفکیک ذخایر اسکارن: مثالی از کانسار آهن در پهنه سنندج-سیرجان شمالی

ابراهیم طالع فاضل*[1]

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

واژه های کلیدی

ایلویت، اسکارن آهن، تجزیه ریزکاوالکترونی، پهنه سنندج- سیرجان شمالی.

چکیده

ایلویت با ترکیب $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ از کانی‌های کمیاب مهم در مرحله دگرسانی پسرونده ذخایر اسکارن محسوب می‌شود. در این پژوهش با استفاده از شواهد میکروسکوپی، پراش پرتو ایکس (XRD) و تجزیه ریزکاوالکترونی (EPMA) به بررسی خصوصیات بلورشناسی، شیمی بلور و شرایط ترمودینامیکی رخداد ایلویت در تکوین یک کانسار اسکارن پرداخته شده است. کانسار اسکارن آهن غلام‌آباد (ذخیره قطعی ۱/۳ میلیون تن و عیار متوسط ۳۷/۲ درصد FeO)، در ۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب دهگلان و پهنه سنندج- سیرجان شمالی، قرار دارد. اسکارن‌زایی در این ذخیره در محل تماس آلکالی گرانیت پورفیری (ژوراسیک بالایی) و توالی سیلت‌سنگ توفی (تریاس- ژوراسیک) روی داده که طبق آن دگرسانی پیشرونده آندرادیت قهوه‌ای-هدنبرژیت نزدیک به توده نفوذی و دگرسانی پسرونده اپیدوت-اکتینولیت- ایلویت در مجاورت سنگ‌های آتشفشانی شکل گرفته است. ایلویت در کانسار غلام‌آباد با فرمول تجربی $Ca_{0.90}Fe^{2+}_{1.88}Fe^{3+}_{0.98}Al_{0.04}Mn_{0.04}Mg_{0.02}Si_{2.14}O_8(OH)$ طی مراحل اولیه دگرسانی پسرونده (دمای ۴۰۰ تا ۴۷۰ °C و $\Delta\log fO_2(HM)$ بین ۴/۲- تا ۴-) از واکنش کانی‌های آندرادیت، مگنتیت و کوارتز شکل گرفته است. پس از آن در مراحل پایانی این دگرسانی (دمای ۲۷۰ تا ۳۵۰ °C)، با افزایش فعالیت X_{CO2} (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۵) و کاهش محتوای اکسیژن محیط (مقادیر $\Delta\log fO_2(HM)$ کمتر از ۴/۵-)، ایلویت به مجموعه کانی‌های مگنتیت، کلسیت و فرواکتینولیت تجزیه شده است. طبق نتایج EPMA، نسبت بالای Fe^{2+}/Fe^{3+} (متوسط ۱/۹۰) و محتوای پایین Mn^{2+} (کمتر از ۰/۰۵ با فرض مجموع ۶ کاتیون) در ترکیب ایلویت کانسار غلام‌آباد حاکی از ارتباط آن با اسکارن‌های آهن بوده که آن را از سایر ذخایر اسکارن متمایز می‌نماید. در مجموع، اگرچه ایلویت به‌عنوان کانی کمیاب در اکثر اسکارن‌ها است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از ترکیب و ترمودینامیک این کانی می‌توان برای تمایز انواع ذخایر اسکارن و تکوین فرایندهای ژئوشیمیایی- اسکارن‌زایی بهره گرفت.

مقدمه

ایلویت (ilvaite) یک کانی سوروسیلیکات کلسیم و آهن با ظرفیت مخلوط و ترکیب کلی $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ می‌باشد که نخستین بار در سال ۱۸۱۱ در جزیره البا (Ilva در لاتین) ایتالیا یافت

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.101355

***نویسنده مسئول:** ابراهیم طالع فاضل e.talefazel@basu.ac.ir

استناد به این مقاله: طالع فاضل، ا. (۱۴۰۲) شیمی کانی کمیاب ایلویت به عنوان ثبت‌کننده شرایط ترمودینامیکی دگرسانی پسرونده و شاخص فلززایی در تفکیک ذخایر اسکارن: مثالی از کانسار آهن در پهنه سنندج-سیرجان شمالی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۱، صفحه ۲۸۳ تا ۳۰۷.
http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.101355

CC BY NC

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

شده است (Gaines et al., 1997). ایلویت مدت‌ها به‌عنوان کانی کمیاب همراه در بسیاری از ذخایر اسکارن Fe، Zn و Pb-Zn کشورهای ایتالیا، یونان، روسیه، ژاپن و آمریکا نیز شناسایی شده است (Gaines et al., 1997; Larsen and Dahlgren, 2002; Chukhrov, 1979; Einaudi et al., 1981). ولی وجود آن در ذخایر اسکارن ایران تاکنون گزارش نشده است. ذخایر اسکارن که از برهمکنش سنگ میزبان کربناتی و سیالات گرمابی-ماگمایی تشکیل می‌شوند، جایگاه مهمی برای تامین منابع آهن، مس، سرب، روی و طلا دارند. مجموعه کانی‌ها و خصوصیات عنصری آن‌ها در ذخایر اسکارن تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی ماگما و سیال، سنگ دیواره یا محیط دربرگیرنده قرار دارد که می‌توان از آنها در رده‌بندی ذخایر اسکارن استفاده کرد. اگرچه کانی‌های گارنت، پیروکسن و آمفیبول مفیدترین سیلیکات‌ها در بررسی خصوصیات ژنتیکی ذخایر اسکارن هستند (Meinert, 1992)، برای انواع اسکارن خاص، ترکیب شیمیایی و تنوع سیلیکات‌های کمیاب نظیر ایلویت می‌تواند نقش مفیدی در شناسایی خصوصیات این ذخایر داشته باشد.

کانسار اسکارن آهن غلام‌آباد (ذخیره قطعی ۱/۳ میلیون تن و عیار متوسط ۳۷/۲ درصد FeO)، در ۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب دهگلان و بخش شمالی پهنه سنندج-سیرجان، قرار دارد (شکل ۱). این کانسار نخستین بار در سال ۱۳۹۸ توسط شرکت مهندسی رایان اکسون به‌روش مگنتومتری مورد اکتشافات ژئوفیزیکی قرار گرفته و در حال حاضر در دو جبهه کاری در حال استخراج است. این پژوهش مشخصات کانی-شناسی، ساختار بلوری و شیمی کانی ایلویت را در کانسار اسکارن آهن غلام‌آباد نشان می‌دهد. ایلویت به‌دلیل کمیاب بودن در ذخایر معدنی بویژه اسکارن‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از ایلویت می‌توان به‌عنوان یک ردیاب مطلوب برای دستیابی به خصوصیات ژئوشیمیایی-فلززایی ذخایر اسکارن استفاده کرد. همچنین، ترکیب شیمیایی ایلویت با سایر ذخایر اسکارن مورد مقایسه قرار گرفته تا بررسی شود که آیا ترکیب آن با توجه به نوع اسکارن و محیط زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی تشکیل متفاوت است یا خیر.

زمین‌شناسی

براساس تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی-ساختاری ایران، منطقه مورد مطالعه در پهنه سنندج-سیرجان شمالی قرار می‌گیرد. در خصوص شرایط تکوین این پهنه دو سناریو وجود دارد: (۱) فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی (Berberian and Berberian, 1981; Mohajjel and Fergusson, 2014) و (۲) شکل‌گیری در یک کافت درون قاره‌ای به‌همراه فعالیت‌های آتشفشانی محدود (Azizi et al., 2020). منطقه مورد مطالعه در نقشه چهارگوش ۱:۲۵۰,۰۰۰ سنندج (Zahedi, 1994) و برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ سنندج (Sartipi, 2005)، قرار دارد. در بخش شمالی سنندج-سیرجان زنجیره‌ای از توده‌های نفوذی مرکب و چندفازی با وسعت ۸۰۰ کیلومترمربع به سن ژوراسیک پسین رخنمون دارند که درون سنگ-های رسوبی و آتشفشانی دگرگون شده تریاس و

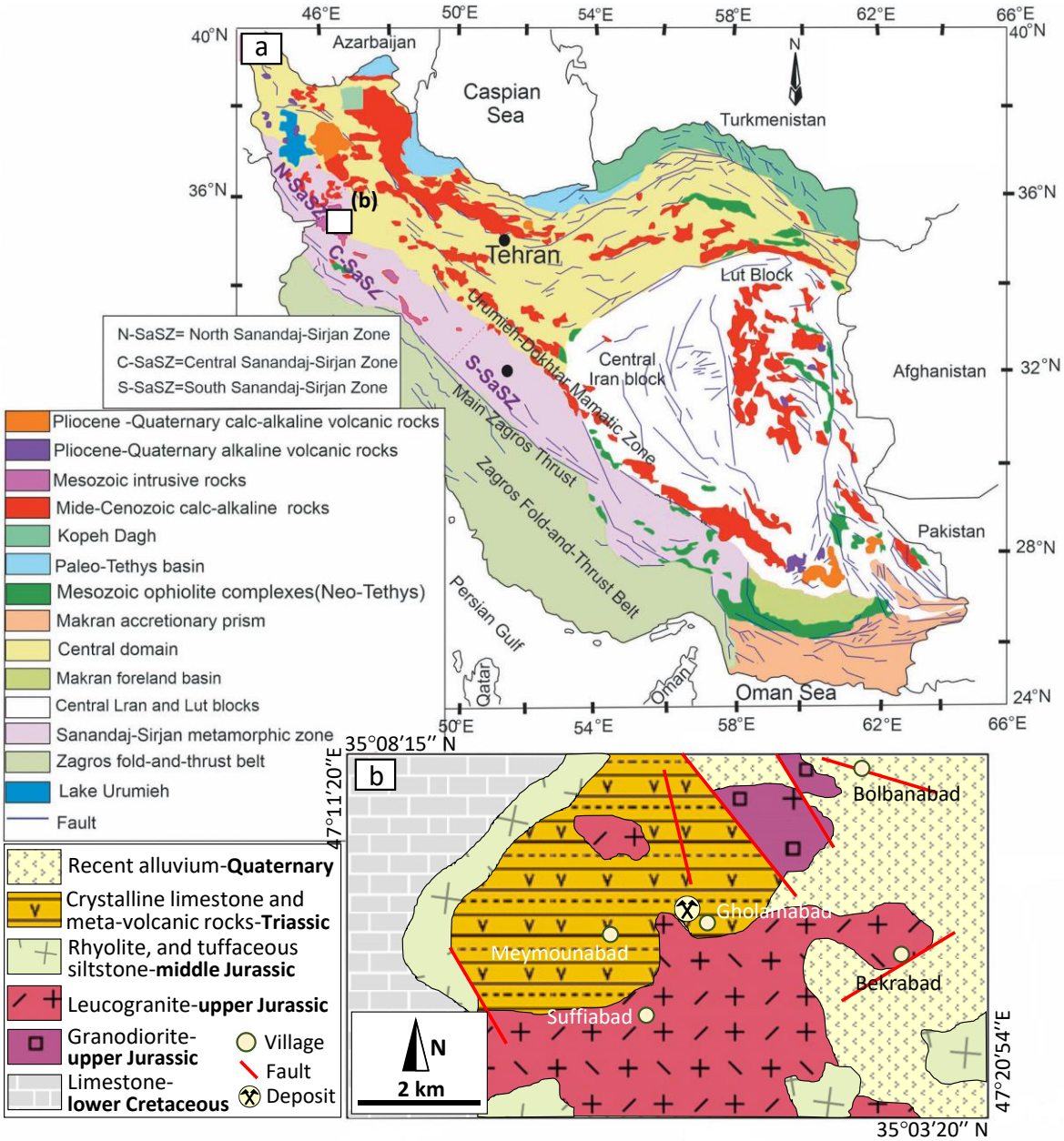
[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

ژوراسیک تزریق شده‌اند. این سنگ‌ها بعداً توسط واحدهای آهکی کرتاسه، نهشته‌های محدود ائوسن و واحدهای کواترنری پوشیده شده‌اند. بر این اساس، قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه شامل سنگ آهک بلوری ضخیم لایه با میان لایه‌های آتشفشانی دگرگونه، فیلیت، اسلیت و ماسه‌سنگ به سن تریاس-ژوراسیک است (شکل ۱). پس از آن توده‌های نفوذی ژوراسیک بالایی (سن ۱۴۴ تا ۱۴۹ میلیون سال بر اساس سن-سنجی‌های U-Pb زیرکن توسط Azizi et al., 2011) و سنگ‌های آتشفشانی و پیروکلاستیکی ژوراسیک در منطقه شکل گرفته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی بیش از نیمی از سطح محدوده مورد مطالعه را پوشش داده‌اند. توالی سیلت‌سنگ توفی (واحد TR_J^{ts}) با ستبرای ۱۷۰۰ متر، رنگ صورتی و سن ژوراسیک میانی مهم‌ترین میزبان لایه‌های آهن‌دار کانسار غلام‌آباد هستند. روند کلی لایه‌ها در این توالی شمال‌غرب-جنوب‌شرق و میانگین میزان شیب آنها حدود ۳۵ درجه به سمت جنوب‌غرب است. میان لایه‌هایی از سنگ آهک قهوه‌ای روشن (واحد TR_J^{l}) در توالی سیلت‌سنگ توفی واحد TR_J^{ts} وجود دارد که به‌دلیل مقاومت بالا در برابر فرسایش از یکدیگر قابل تفکیک هستند. ترکیب این واحد کربناتی از سنگ آهک میکرواسپارایت با کانی غالب کلسیت و مقادیر ناچیز پیریت است. مطالعات میکروسکوپی وقوع دگرگونی مجاورتی به‌صورت بافت گرانوبلاستیک و تبلور مجدد بلورهای کلسیت را تایید کرده است. روند واحد سنگ آهک شرقی-غربی با شیب ۴۰ درجه به سمت جنوب است. سنگ‌های نفوذی اسیدی (واحد gr) شامل لوکوگرانیت تا میکروگرانیت، و دیوریت تا گابرودیوریت در جنوب کانسار آهن غلام‌آباد رخنمون دارند. دگرسانی سریسیتی مهم‌ترین دگرسانی در توده‌های نفوذی منطقه است. جهت‌گیری گسل‌ها در منطقه غلام‌آباد در تمام روندها دیده می‌شود. این گسل‌ها، در قسمت‌های کمی از محدوده باعث جدایش مرز واحدهای سنگی از یکدیگر شده، ولی به طور کلی گسل‌ها در این محدوده نقش مهمی در کنترل لیتولوژیکی واحدها نداشته‌اند.

روش پژوهش

به‌منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، تعداد ۳۵ نمونه از پهنه‌های مختلف اسکارنی جمع‌آوری شده و مورد مطالعات پتروگرافی قرار گرفتند. مطالعات کانی-شناسی و شناسایی کانی ایلویت ابتدا توسط میکروسکوپ نوری عبوری-بازتابی ZEISS مدل Axioplan2 انجام شد. سپس برای اطمینان از وجود این کانی، تعداد ۳ نمونه توسط فناوری پراش پرتو ایکس (XRD) مدل X'pert فیلیپس و پرتو اولیهٔ $CuK\alpha_1$ (λ=1.54059 Å)، توان ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۵ میلی-آمپر در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه سالامانکا (اسپانیا) مورد آزمایش قرار گرفت. داده‌ها از صفر تا ۷۰/۰ درجهٔ ۲θ، با اندازه گام ۰/۰۲ درجه جمع‌آوری شد. همچنین، برای شناسایی ترکیب شیمیایی و خصوصیات بافتی، تعداد ۲۰ نقطه از ۵ بلور مختلف ایلویت همراه با تصاویر الکترونی برگشتی (BSE) در موسسه زمین‌شناسی و کانی‌شناسی Novosibirsk روسیه، مورد تجزیه ریزکاوالکترونی (EPMA)، قرار گرفتند.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



شکل ۱- a) نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران (Sarjoughian et al., 2022; Aghanabati, 1998). b) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از موقعیت کانسار آهن غلام‌آباد در برگه سنندج (Sartipi, 2005).

Fig. 1. a) Simplified geological map of Iran (modified after Aghanabati, 1988; Sarjoughian et al., 2022). b) Location of Gholamabad Fe skarn deposit in the simplified geological map of Sanandaj (Sartipi, 2005).

این آزمایش بر روی مقطع صیقلی پس از انجام اندود کربنی (ضخامت ۵۰ آنگستروم) توسط فناوری ریزکاو الکترونی مدل Cameca SX100 با جریان ۳۴ نانوآمپر (nA)، ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت، قطر باریکه الکترونی ۵ میکرون و زمان شمارش ۲۰ ثانیه، انجام شد. استانداردهای مورد استفاده در ریزکاوالکترونی عبارت

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

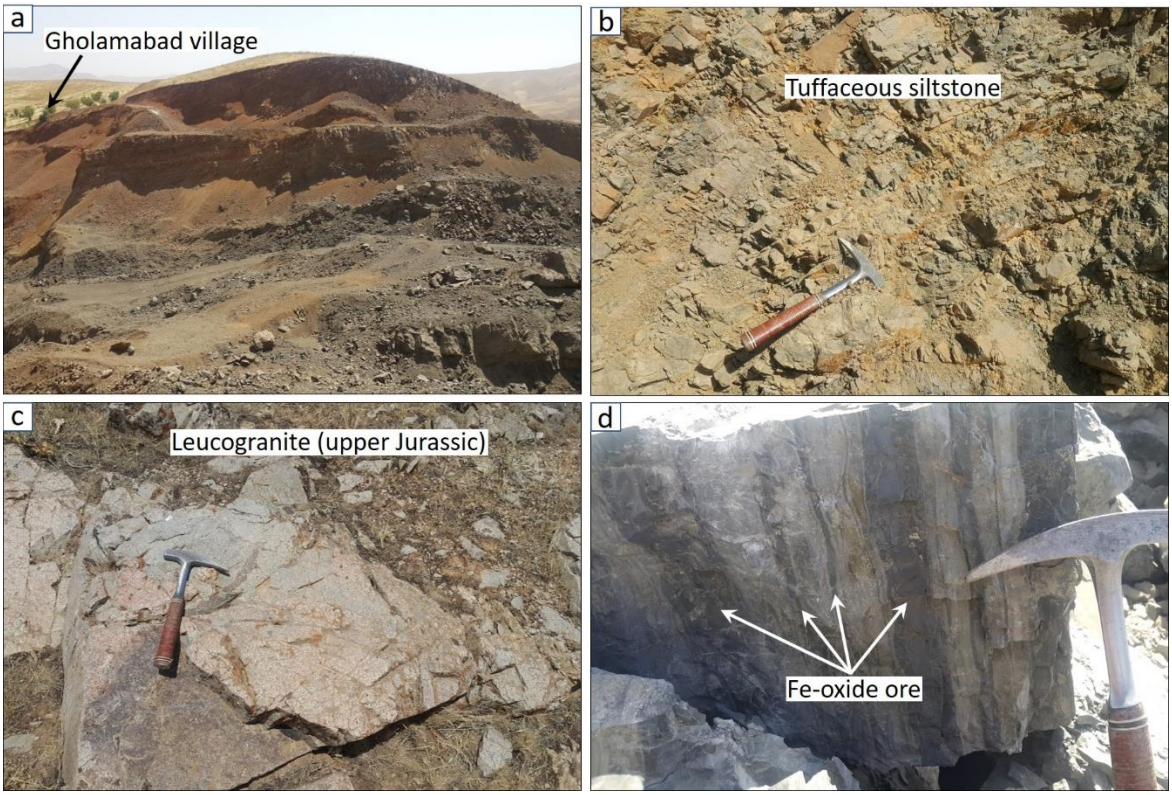
بودند از: آلبیت برای سدیم، دیوپسید برای کلسیم و سیلیس، کیانیت برای آلومینیوم، فورستریت برای منیزیم، فایالیت برای آهن، ارتوکلاز برای پتاسیم، اسفن برای تیتانیوم، و اسپسارتین برای منگنز. زاویه جهش ژئومتری پرتو ایکس دستگاه بین ۴۰ تا ۵۲ درجه و خطای تجزیه کمتر از ۱۰ گرم در تن، گزارش شده است.

سنگ‌شناسی و اسکارن‌زایی

طبق برداشت‌های زمین‌شناسی محلی در محدوده کانسار آهن غلام‌آباد (شکل ۲-a) سه واحد سنگی اصلی شامل (۱) توالی سنگ آهک با میان لایه‌های آتشفشانی موسوم به سیلت‌سنگ توفی به سن تریاس- ژوراسیک (شکل ۲-b)، (۲) توده لوکوگرانیتی ژوراسیک بالایی (شکل ۲-c) و (۳) لایه‌های مگنتیت به همراه کالک-سیلیکات اسکارن (شکل ۲-d)، مشاهده شده است. واحد سنگ آهک متشکل از لایه‌های ضخیم آهک‌های بازبلورین خاکستری تا خاکستری تیره بوده که با ضخامتی حدود ۷۵۰ متر دارای میان لایه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی پیروکلاستیک و گاهی روانه‌های جریانی با جنس توف‌ریولیتی و ایگنمبریت هستند. این واحد سنگی در ناحیه جنوب دهگلان شامل داسیت، تراکی آندزیت، تراکی داسیت، تراکی بازالت و توف‌های ریولیتی سیلیسی هستند. توده گرانیتوئیدی منطقه موسوم به گرانیت بلبان‌آباد متشکل از لوکوگرانیت‌های آلکالن با رنگ صورتی و بافت پورفیری- گرانولار است که دارای رخنمون‌های محدود از سنگ‌های مافیک می-باشند. ترکیب این سنگ‌ها آلکالی گرانیت و سینوگرانیت پورفیری با کانی‌های اصلی کوارتز، ارتوکلاز گرانوفیری و پلاژیوکلاز به‌همراه کانی‌های کمیاب زیرکن، تیتانیت، مگنتیت و ایلمنیت است. طبق مطالعات یاجم و قلمقاش (Yajam and Ghalamghash, 2019) واحد گرانیت بلبان‌آباد از دو سرشت گرانیت A2-type و I-type تشکیل شده که در اثر بالاآمدگی آستنوسفر و ذوب-بخشی پی‌سنگ ناشی از کشش حاصل از عقبگرد یا افزایش شیب ورقه فرورانده پس از رژیم تکتونیکی فشارشی حاکم بر منطقه شکل گرفته است. طبق این مطالعات سرشت توده گرانیتی در مجاورت کانسار غلام‌آباد از نوع گرانیت‌های اکسیدان I-type با سن ۱۴۰ تا ۱۴۹ میلیون سال ذکر شده است (Yajam and Ghalamghash, 2019).

اسکارن‌زایی در کانسار غلام‌آباد در محل تماس آلکالی گرانیت پورفیری و توالی سیلت‌سنگ توفی شکل گرفته است (شکل ۳-a). طبق شواهد صحرایی و لاگ-نگاری مغزه‌ها، پهنای اسکارن‌زایی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و تا عمق ۲۰۰ متر گسترش دارد. مشابه بسیاری از کانسارهای اسکارن آهن (Meinert et al., 2003; Atkinson and Einaudi, 1978)، پهنه‌بندی اسکارنی از سمت توده نفوذی به سنگ درونگیر وجود دارد که طبق آن دگرسانی پیشرونده آندرادیت قهوه‌ای- هدنبرژیت نزدیک به آلکالی گرانیت پورفیری و دگرسانی پسرونده اپیدوت- اکتینولیت- ایلویت در مجاورت سنگ‌های سیلت‌سنگ توفی مشاهده شد. واحد هورنفلس را می-توان به‌صورت محدود در فصل مشترک واحد سیلت-سنگ توفی و گرانیت پورفیری مشاهده کرد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



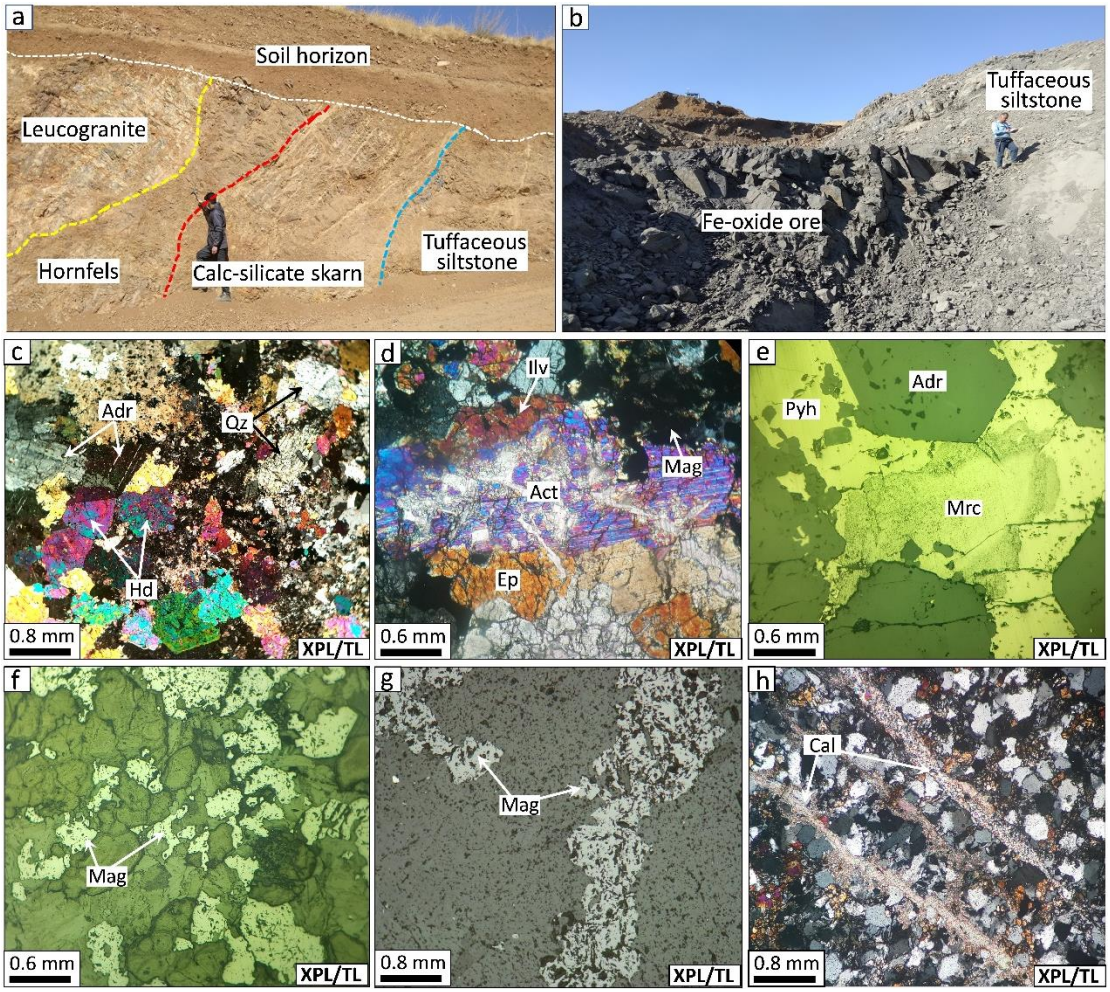
شکل ۲- تصاویر صحرایی بخش‌های مختلف کانسار آهن غلام‌آباد. a) نمایی از سینه کار اصلی معدن (دید به سمت جنوب). b) واحد سنگی سیلت‌سنگ توفی. c) واحد لوکوگرانیت ژوراسیک بالایی. d) باندهای کانسنگ آهن در میزبان کالک‌سیلیکات اسکارن.

Fig. 2. Field images from different parts of the Gholamabad Fe deposit. a) A view of the main working pit of the mine (view to south). b) Tuffaceous siltstone unit. c) Upper Jurassic leucogranite. d) Fe-oxide ore bands in calc-silicate skarn.

طبق شواهد صحرایی و میکروسکوپی، شدت دگرسانی و کانی‌سازی با فاصله از توده گرانیتی کاهش یافته و بخش عمده کانی‌سازی آهن در مجاورت واحد سیلت‌سنگ توفی رخداده است (شکل ۳-b). به طور کلی، شکل‌گیری مجموعه کانی‌های کالک سیلیکات اسکارن در کانسار آهن غلام‌آباد طی دو مرحله پیشرونده و پسرونده صورت گرفته است. مرحله پیشرونده با حضور آندرادیت (۸۰-۹۵ درصدحجمی)، هدنبرژیت (۵-۱۰ درصدحجمی)، کلسیت (۵ درصدحجمی) و کوارتز (۳ درصدحجمی) مشخص می‌شود (شکل ۳-c). نخستین کانی متبلور شده گارنت بوده که معمولاً بلورهایی با ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر تشکیل می‌دهد. هدنبرژیت به‌صورت بلورهای منفرد و پراکنده همراه آندرادیت مشاهده شد. در مرحله پسرونده کانی‌های اکسیدی (مگنتیت و هماتیت)، ایلویت، اپیدوت، کوارتز، اکتینولیت±ترمولیت و کلسیت تشکیل شده است (شکل ۳-d). فضای خالی و حفرات موجود در این واحد سنگی در مراحل بعدی توسط کانه‌های سولفیدی پیروتیت-پیریت±مارکاسیت اشغال شده است (شکل ۳-e). مگنتیت با بافت دانه‌پراکنده (شکل ۳-f) یا رگه-رگچه‌ای در میزبان گارنت (شکل ۳-g) وجود دارد. رگه-رگچه‌های کلسیت±کوارتز در آخرین مرحله کلیه

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

کانسنگ‌های فلزی و کالک سیلیکات اسکارن را قطع کرده است (شکل ۳-h).



شکل ۳- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی اسکارن‌زایی در کانسار آهن غلام‌آباد. a) منطقه‌بندی توده لوکوگرانیتی، هورنفلس، کالک-سیلیکات اسکارن و واحد سیلت‌سنگ توفی (دید به سمت شمال‌شرق). b) محل تماس کانسنگ آهن با واحد سیلت‌سنگ توفی (دید به سمت شمال). c) مجموعه کانی‌های هدنبرژیت، آندرادیت و کوارتز در بخش دگرسانی پیشرونده. d) مجموعه کانی‌های اکتینولیت، مگنتیت، اپیدوت و ایلویت در بخش دگرسانی پسرونده. e) بافت پرکننده فضای خالی آندرادیت توسط پیروتیت و مارکاسیت. f) بافت دانه‌پراکنده مگنتیت. g) بافت رگه-رگچه‌ای مگنتیت. h) رگه‌های کلسیت تاخیری در واحد سیلت‌سنگ توفی میزبان. علایم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Adr: آندرادیت، Qz: کوارتز، Hd: هدنبرژیت، Act: اکتینولیت، Ep: اپیدوت، Mag: مگنتیت، Ilv: ایلویت، Cal: کلسیت، Mrc: مارکاسیت، Pyh: پیروتیت).

Fig. 3. Field and photomicrographs from skarnification in the Gholamabad Fe deposit. a) zoning of leucogranite body, hornfels, calc-silicate skarn, and tuffaceous siltstone (view to NE). b) contact point of Fe-oxide ore with tuffaceous siltstone unit (view to north). c) retrograde alteration with hedenbergite, andradite, and quartz assemblage. d) prograde alteration with actinolite, magnetite, epidote, and ilvaite assemblage. e) open-space filling texture of pyrrhotite and marcasite within andradite. f) disseminated texture of magnetite. g) vein-veinlets texture of magnetite. h) late carbonate veins within tuffaceous siltstone. Abbreviations from Warr (2021) (Adr: andradite, Qz: quartz, Hd: hedenbergite, Act: actinolite, Ep: epidote, Mag: magnetite, Ilv: ilvaite, Cal: calcite, Mrc: marcasite, Pyh: pyrrhotite).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

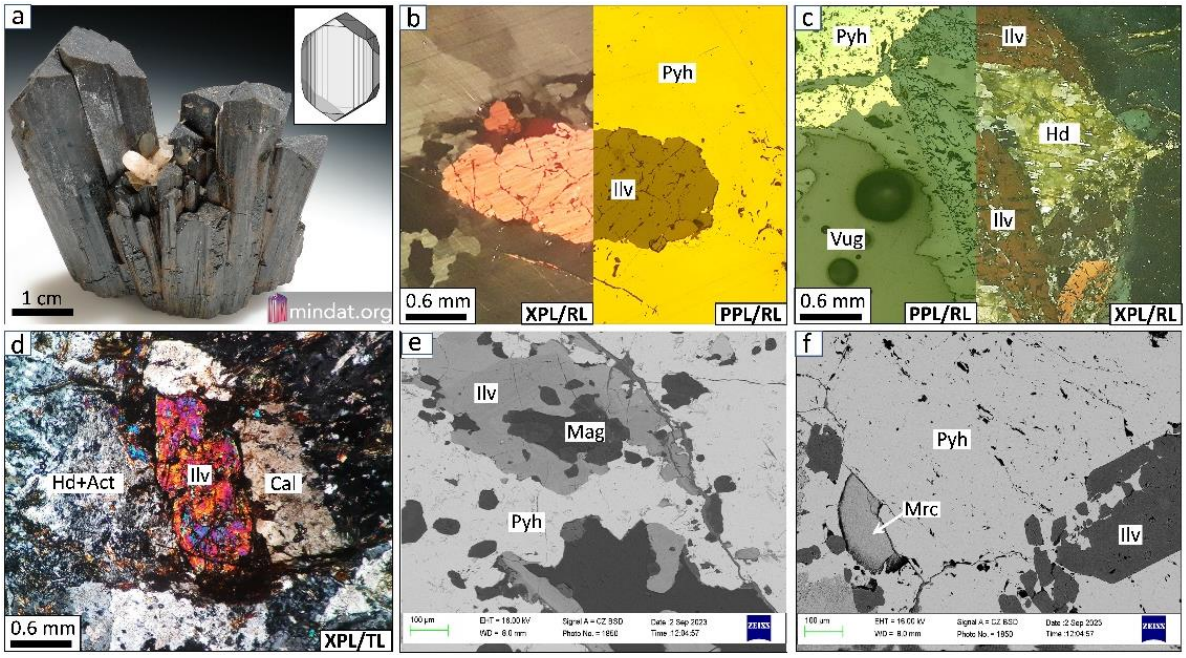
کانه‌زایی

طبق شواهد صحرایی، دو لایه‌ی آهن‌دار با ضخامت متغیر ۱ تا ۱۰ متر و طول ۵۰ تا ۱۰۰ متر با ترکیب کانه مگنتیت به‌صورت هم امتداد و هم‌شیب با لایه‌بندی توالی رسوبی آذرآواری (سیلت‌سنگ توفی) در کانسار غلام‌آباد وجود دارد. امتداد لایه‌های مگنتیت بین N45W تا N70W متغیر بوده و میزان شیب آنها بین ۳۵ تا ۴۵ درجه به سمت جنوب‌غرب است. میان لایه‌های محدود دیگری با حداکثر ضخامت ۲ متر در اطراف دو لایه اصلی مگنتیت وجود دارد. در زمینه مگنتیت کانه‌های پیروتیت، پیریت و کالکوپیریت هم وجود دارد. بر اساس گزارش‌های اکتشافی منطقه، محتوای آهن کل یا Fe_2O_3 در لایه‌های مگنتیت کانسار غلام‌آباد بین ۷۲/۸۹ تا ۷۷/۶۶ درصدوزنی و سیلیس ۱۱/۱۷ تا ۱۲/۷۵ درصدوزنی متغیر است (Sepehr Sanat Asia, 2020). همچنین، محتوای فسفر (P_2O_5) و گوگرد در این لایه‌ها به ترتیب حدود ۰/۲۹ و ۱/۱ درصدوزنی گزارش شده است. مقادیر جزیی آرسنیک (۴۵ تا ۲۵۶ گرم در تن) و طلا (کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم در تن) در کانسنگ سولفیدی گزارش شده است. در بخش‌های مختلفی از کانسار غلام‌آباد، نشانه‌های متاسوماتیک سدیک-کلسیک به‌عنوان مناطق اندوسکارن وجود دارند که مناطق نسبتاً بزرگی (حدود ۴۰ تا ۲۵۰ متر عرض) را تشکیل می‌دهند. پس از شکل‌گیری، کانسنگ آهن و سنگ میزبان کانسار توسط گسل‌های N50W قطع و در نتیجه گسلش شکسته شده‌اند.

کانی‌شناسی و نحوه رخداد ایلویت

کانی کمیاب ایلویت با سختی درجه موس ۵/۵ تا ۶، چگالی ۳/۹ تا ۴/۰ g/cm^3 و سیستم تبلور اورترومبیک ($a = 8.800$ Å, $b = 13.019$ Å, $c = 5.852$ Å) در نمونه دستی دارای جلای سیاه صمغی مات بوده که در لبه‌های نازک‌تر، به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای تا سبز-قهوه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۴-a). این کانی در بخش دگرسانی پسرونده کانسار غلام‌آباد با فراوانی کمتر از ۱ درصدحجمی توسط شواهد میکروسکوپی نوری-الکترونی و XRD شناسایی شده است. ایلویت در نور بازتابی عادی دارای رنگ خاکستری مات با ته‌رنگ آبی بوده که در نور متقاطع ناهمسانگردی قوی نارنجی-قرمز نشان می‌دهد (شکل ۴-b). ایلویت در کانسار غلام‌آباد به‌صورت بلورهای بی‌شکل و ابعاد ۱ تا ۳ میلیمتر در میزبان پیروتیت (شکل ۴-b) و منشوری با ابعاد ۲ تا ۵ میلیمتر همراه کلسیت، هدنبرژیت و اکتینولیت (شکل ۴-c و d) تبلور یافته است. طبق شواهد SEM برخی از بلورهای ایلویت حاوی ادخال‌های فراوان مگنتیت بوده (شکل ۴-e) و یا توسط کانه‌های سولفیدی به‌صورت تأخیری دربرگرفته شده است (شکل ۴-f). نتایج آزمایش XRD از نمونه‌های بخش دگرسانی پسرونده گویای حضور ایلویت در کنار کانی‌های کوارتز، اپیدوت، آندرادیت و مگنتیت است (شکل ۵).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



شکل ۴- تصاویر مختلف از کانی‌شناسی ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد (به جز تصویر a). a) ایلویت با فرم بلوری اورترومبیک و جلای صمغی سیاه (برگرفته از سایت mindat.org). b) تصویر میکروسکوپ نوری از فنوکریست ایلویت در زمینه پیروتیت. c) تصویر میکروسکوپ نوری از اجتماع کانی‌های ایلویت، هدنبرژیت و پیروتیت. d) تصویر میکروسکوپ نوری از ایلویت منشوری در زمینه هدنبرژیت-اکتینولیت و کلسیت. e) تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) از ادخال‌های مگنتیت در زمینه ایلویت. f) تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) از بلور منشوری ایلویت که شکستگی‌های آن توسط کانه‌های سولفیدی پیروتیت و مارکاسیت در برگرفته شده است. علایم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Hd: هدنبرژیت، Act: اکتینولیت، Mag: مگنتیت، Ilv: ایلویت، Cal: کلسیت، Mrc: مارکاسیت، Pyh: پیروتیت).

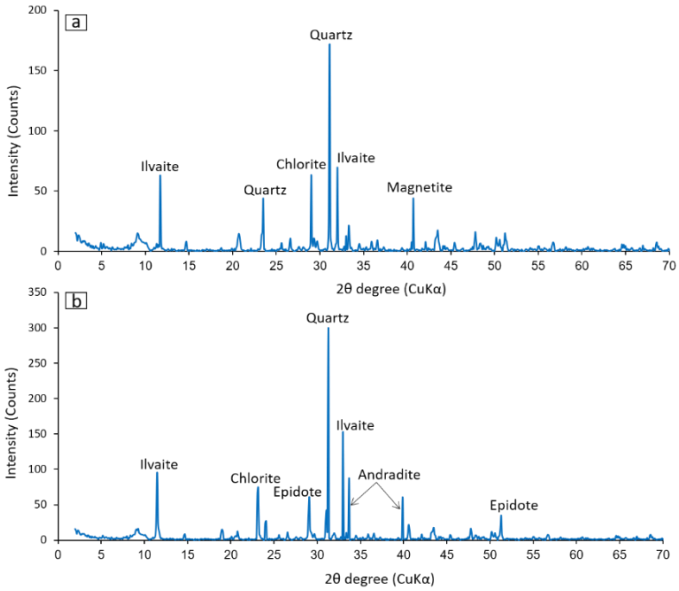
Fig. 4. Various images from ilvaite mineralogy in the Gholamabad Fe deposit (except image a). a) ilvaite with orthorhombic crystals with black gummy polish (adopted from mindat.org). b) photomicrograph of ilvaite phenocryst within pyrrhotite. c) photomicrograph of ilvaite, hedenbergite, and pyrrhotite minerals. d) photomicrograph of prismatic ilvaite accompanied with hedenbergite-actinolite and calcite. e) BSE image of magnetite inclusions within ilvaite. f) BSE image of the prismatic ilvaite crystal in which fractures are enclosed by the pyrrhotite and marcasite minerals. Abbreviations from Warr (2021) (Hd: hedenbergite, Act: actinolite, Mag: magnetite, Ilv: ilvaite, Cal: calcite, Mrc: marcasite, Pyh: pyrrhotite).

نقشه عنصری و شیمی بلور ایلویت

ایلویت دارای فرمول استوکیومتری $<Ca>\{2Fe^{2+},Fe^{3+}\}[Si_2]O_8(OH)$ است که در آن نمادهای < >، {}، و [] به‌ترتیب کاتیون‌ها را در موقعیت‌های هفت‌گانه، هشت‌وجهی و چهاروجهی نشان می‌دهند (Ghose et al., 1985). اصلاحات ساختار بلوری نشان می‌دهد که این کانی شامل زنجیره‌های دوتایی مشترک هشت وجهی (موقعیت A) است که به موازات محور c قرار دارند و نیمی از هشت‌وجهی‌های بزرگ‌تر (موقعیت B) متصل به امتداد زنجیره‌هایی هستند که لبه‌های مشترک با هشت‌وجهی مکان A را دارند (Finger et al., 1982; Ghose et al., 1984). این زنجیرها توسط گروه‌های Si_2O_7 و یون‌های Ca^{2+} در کنار

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

هم نگهداری می‌شوند. محل A حاوی Fe^{2+} و Fe^{3+} است، در حالی که محل‌های B حاوی Fe^{2+} باقیمانده و مقادیر کمی از ناخالصی‌های Mn^{2+} هستند. ایلویت در دمای اتاق مونوکلینیک بوده و بین ۳۳۳ تا ۳۴۳ درجه کلوین از ساختار مونوکلینیک به ساختار اورترومبیک تغییر می‌کند (Ghose et al., 1985). جدول ۱ ترکیب شیمیایی ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تصاویر دیفراکتوگرام XRD از بخش دگرسانی پسرونده و حضور ایلویت همراه کانی‌های دیگر.

Fig. 5. XRD diffractograms from retrograde alteration with ilvaite and other minerals.

محاسبه فرمول تجربی این کانی به‌دلیل عدم قطعیت در نسبت‌های Fe^{2+} به Fe^{3+} و حضور OH در نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی مشکل‌ساز است. در این پژوهش، فرمول ساختاری ایلویت با فرض مجموع ۶ کاتیون و ۹ اتم اکسیژن و تخمین Fe^{3+} از تعادل بار فرمول، محاسبه شده است. بر اساس تجزیه ریزکاوالکترونی ۲۰ نقطه از این کانی در تعداد ۵ بلور مختلف از کانسنگ دگرسانی پسرونده و احتساب ترکیب متوسط، فرمول تجربی $Ca_{0.90}Fe^{2+}_{1.88}Fe^{3+}_{0.98}Al_{0.04}Mn_{0.04}Mg_{0.02}Si_{2.14}O_8(OH)$ برای ایلویت‌های کانسار غلام‌آباد به دست آمد (جدول ۱). در این ترکیب مقادیر ناچیز Mn^{2+} و Al^{+3} به‌ترتیب جایگزین کاتیون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} می‌شوند. بر همین اساس، نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} بین ۱/۵۸ تا ۲/۲۳ (متوسط ۱/۹۰) و نسبت FeO_t/FeO_t+MnO بین ۰/۹۷ تا ۱/۰ (متوسط ۰/۹۸) به دست آمد (جدول ۱). همچنین، مقادیر FeO بین ۵۱/۰۵ تا ۵۵/۳۴ درصدوزنی (متوسط ۵۲/۵۱ درصدوزنی) و SiO_2 بین ۲۸/۶۵ تا ۳۰/۱۹ درصدوزنی (متوسط ۲۹/۴۳ درصدوزنی) در ترکیب ایلویت کانسار غلام‌آباد به دست آمد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

جدول ۱- نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی ایلویت در دگرسانی پسرونده از کانسار غلام‌آباد.

Table 1. Electron microprobe analysis of ilvaite from the retrograde alteration in Gholamabad deposit.

	Pt-01	Pt-02	Pt-03	Pt-04	Pt-05	Pt-06	Pt-07	Pt-08	Pt-09	Pt-10	Pt-11	Pt-12	Pt-13	Pt-14	Pt-15	Pt-16	Pt-17	Pt-18	Pt-19	Pt-20
Weight percent (wt%)																				
SiO_2	29.84	30.06	29.57	29.74	30.19	29.14	29.07	29.76	29.87	29.22	28.65	28.72	29.46	29.45	29.57	28.88	28.81	29.5	29.63	29.5
TiO_2	BDL	BDL	BDL	BDL	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	BDL	0.02	BDL	0.03	BDL	BDL	0.03	0.02	BDL	BDL	0.02
Al_2O_3	1.64	1.38	0.7	0.72	0.89	0.22	0.87	0.41	0.25	0.43	0.35	0.45	0.65	0.38	0.76	0.32	0.45	0.35	0.23	0.26
[1]FeO	51.05	51.11	52.1	52.01	52.18	52.45	51.85	53.07	52.48	52.66	51.62	52.47	53.34	53.31	52.84	51.68	52.41	52.64	53.71	53.34
MnO	0.83	0.67	0.74	0.61	0.57	0.56	0.57	0.62	1.48	0.57	1.48	1.32	0.74	0.67	1.36	1.33	0.32	0.54	0.37	0.26
MgO	0.11	0.04	0.03	0.04	0.12	0.11	0.13	0.21	0.23	0.14	0.16	0.14	0.23	0.27	0.11	0.12	0.09	0.08	0.12	0.13
CaO	14.11	14.03	13.89	14.01	14.13	13.88	13.98	13.89	14.17	13.98	13.52	13.43	13.72	14.32	14.12	13.73	13.77	13.95	14.1	14.06
Total	97.58	97.29	97.03	97.13	98.11	96.38	96.49	97.98	98.50	97.00	95.80	96.53	98.17	98.40	98.76	96.09	95.87	97.06	98.16	97.57
Cations based on 9 oxygens																				
Si	2.26	2.24	2.24	1.98	2.18	1.87	1.89	1.83	2.06	1.95	1.94	2.07	2.08	2.36	2.24	2.17	2.61	2.43	2.3	2.17
Ti	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001
Al	0.12	0.1	0.05	0.05	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Fe^{2+}	1.65	1.75	1.82	1.91	1.79	2.12	2.13	2.21	1.87	1.96	2.04	1.86	1.98	1.78	1.88	1.96	1.67	1.75	1.78	1.77
[2]Fe^{3+}	1.02	0.98	0.95	1.13	1.03	1.05	0.97	0.99	1.06	1.12	1.01	1.08	0.98	0.87	0.85	0.87	0.76	0.86	0.97	1.12
Mn	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03	0.08	0.07	0.04	0.03	0.07	0.07	0.02	0.03	0.02	0.01
Mg	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.89	0.90	0.90	0.89	0.88	0.86	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Total cations	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Fe^{2+}/Fe^{3+}	1.62	1.79	1.92	1.69	1.74	2.02	2.20	2.23	1.76	1.75	2.02	1.72	2.02	2.05	2.21	2.25	2.20	2.03	1.84	1.58
FeO_t/FeO_t +MnO	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	1.00

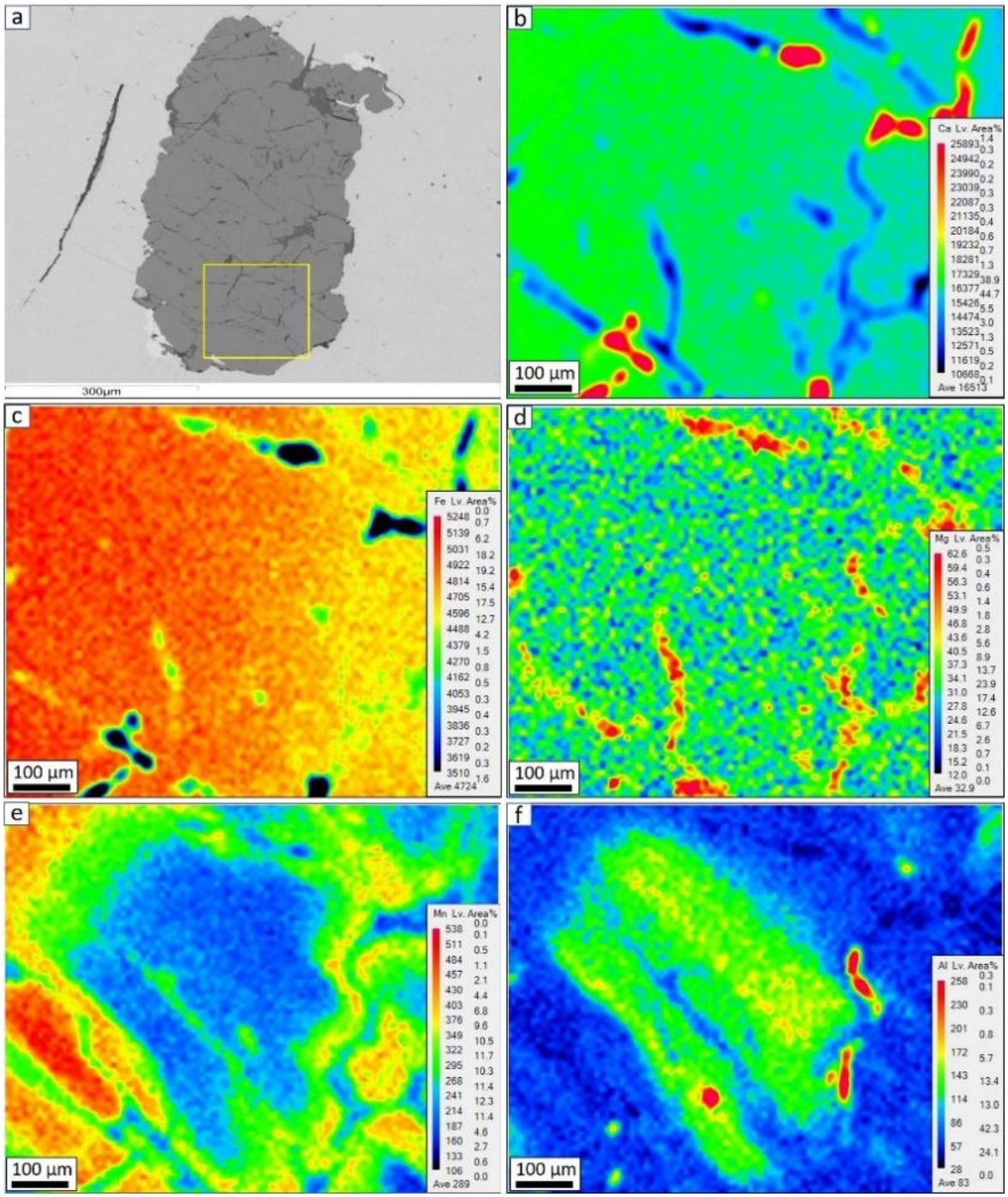
BDL: below detection limit; NA: not analysed.

1 All iron as FeO

2 Calculated from structural formula based on Droop et al. (1987).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



شکل ۶- تصویر BSE (a) و تصاویر نقشه عنصری از بلور ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد. b) نقشه عنصری کلسیم. c) نقشه عنصری آهن. d) نقشه عنصری منیزیم. e) نقشه عنصری منگنز. f) نقشه عنصری آلومینیوم.

Fig. 6. BSE image (a) and elemental map images of ilvaite crystal in the Gholamabad Fe deposit. b) elemental map of calcium. c) elemental map of iron. d) elemental map of magnesium. e) elemental map of manganese. f) elemental map of aluminum.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

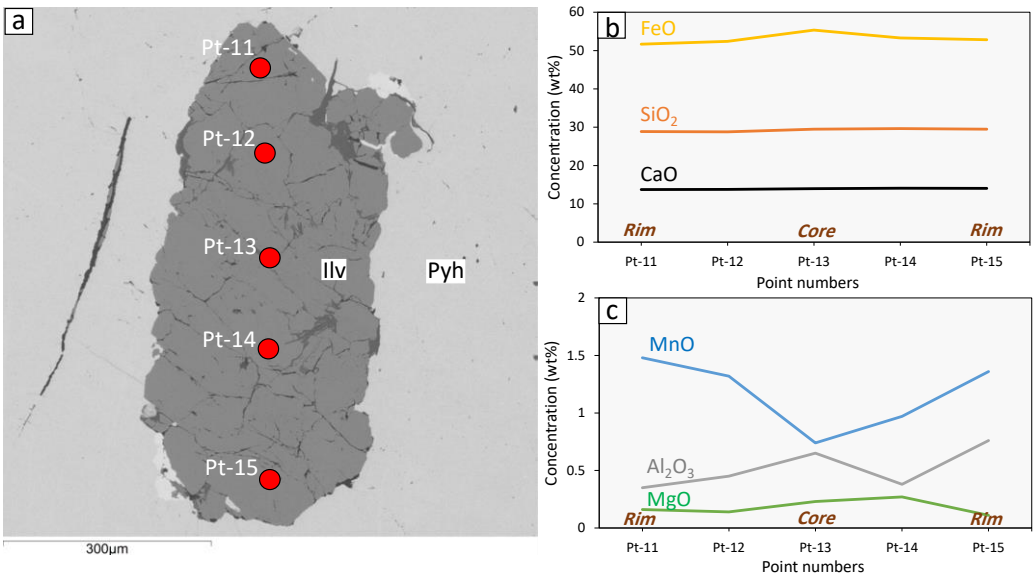
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9,1.101355]

طبق شواهد نقشه عنصری ایلویت در کانسار غلام‌آباد یک منطقه‌بندی شیمیایی از قطب غنی از آهن و منیزیم و فقیر از منگنز در هسته تا قطب فقیر از آهن و منیزیم و غنی از منگنز در حاشیه نشان می‌دهد (شکل‌های ۶ و ۷). سایر عناصر اصلی و فرعی نظیر کلسیم، سیلیس و آلومینیوم تغییرات خاصی نداشتند (شکل ۷).

بحث

روابط ترمودینامیکی ایلویت در مرحله دگرسانی پسرونده

ایلویت در دمای متوسط تا پایین (کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشارهای سیال بالا پایدار بوده و در محدوده وسیعی از fO_2 رخ می‌دهد که بر مبنای آن دو نوع آهن احیا و اکسید در ترکیب آن وجود دارد. طبق مطالعات مارتین و دلگادو (Martin and Delgado, 2010) ایلویت در فشارهای کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال تشکیل نمی‌شود و صرفاً از سیالاتی با محتوای CO_2 کم یا بسیار کم رخ می‌دهد. با این حال، طبق این پژوهش مشخص شده که فعالیت کانی‌های واکنش‌دهنده و H_2O در سیستم بر پایداری ایلویت تأثیر گذار بوده و در شرایط ژئوشیمیایی مناسب می‌تواند تحت فشار کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال نیز تشکیل شود.



شکل ۷- تصویر BSE (a) و تجزیه ریزکاوالکترونی نقطه‌ای از بخش‌های حاشیه تا هسته بلور ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد. b) عناصر اکسیدی اصلی آهن، سیلیس، کلسیم و c) عناصر اکسیدی کمیاب منگنز، آلومینیوم و منیزیم. علایم اختصاری از وار (Warr, 2021) (Ilv: ایلویت، Pyh: پیروتیت).

Fig. 7. BSE image (a) and EPMA results from the various parts of ilvaite crystal from rim to core in the Gholamabad Fe deposit. b) main oxide elements of FeO, SiO_2, CaO, and c) rare oxide elements of MnO, Al_2O_3, and MgO. Abbreviations from Warr (2021) (Ilv: ilvaite, Pyh: pyrrhotite).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

نسبت پایین P_{H2O}/P_{total} همچنین می‌تواند محدوده پایداری حرارتی ایلویت را کاهش دهد (Gustafson, 1974). علاوه بر این، pH نسبتاً پایین باعث تشکیل ایلویت می‌شود. با این حال، اثرات درجه حرارت و حالت اکسیداسیون عمده بر پایداری ایلویت را می‌توان با در نظر گرفتن واکنش بین گونه‌های خنثی ارزیابی کرد. شکل ۸ پایداری کانیایی ایلویت همراه مجموعه کانی‌های آندرادیت، فرواکتینولیت و هدنبرژیت را با استفاده از داده‌های ترمودینامیکی برمن (Berman, 1988) نشان می‌دهد. در مدل ترمودینامیکی ایلویت، اگرچه اکسیژن در تمام واکنش‌های جایگزینی مشارکت دارد و شکل‌گیری همه کانی‌ها وابسته به تغییرات fO_2 محیط است، با این وجود این نوسان اکسیژن برای تبلور یا تجزیه ایلویت بسیار ناچیز است. بنابراین، تبلور یا تجزیه ایلویت مستلزم حضور عامل اکسید کننده قوی (نظیر سولفات‌ها)، یا شکل‌گیری در یک سیستم باز بوده که با افزودن یا حذف عناصر آهن، کلسیم و سیلیس، همراه است. در دماهای بالا (۴۰۰ تا ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد) و مقادیر $\Delta\log fO_2(HM)$ بین ۴- تا ۴/۲-، شکل‌گیری ایلویت از طریق ترکیب کانی‌های آندرادیت، مگنتیت و کوارتز مطابق واکنش ۱رخ می‌دهد.

$$12Ca_3Fe^{3+}{}_2Si_3O_{12}\ (\text{آندرادیت}) + 28Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4\ (\text{مگنتیت}) + 36SiO_2\ (\text{کوارتز}) + 18H_2O \rightarrow 36CaFe^{2+}(Fe^{2+}Fe^{3+})\cdot(Si_2O_7)O(OH)\ (\text{ایلویت}) + 11O_2$$

واکنش ۱

واکنش مهمی که می‌تواند منجربه تشکیل ایلویت در کانسار غلام‌آباد شده باشد، تجزیه هدنبرژیت بر اساس واکنش ۲ است. تصاویر پتروگرافی (شکل ۴-c و d) نیز موید شکل‌گیری ایلویت از ترکیب کانی‌های هدنبرژیت و مگنتیت در حضور آب است.

$$12CaFe^{2+}Si_2O_6\ (\text{هدنبرژیت}) + 8Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4\ (\text{مگنتیت}) + 6H_2O \rightarrow 12CaFe^{2+}(Fe^{2+}Fe^{3+})\cdot(Si_2O_7)O(OH)\ (\text{ایلویت}) + O_2$$

واکنش ۲

طی مرحله اسکارن پسرونده ایلویت با افزایش میزان سیلیس محیط به کانی‌های فرواکتینولیت و مگنتیت تبدیل می‌شود (واکنش ۳) که به‌نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین واکنش‌های تشکیل مگنتیت در کانسار غلام‌آباد باشد. این واکنش در دمای ۴۰۰ تا ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و مقادیر $\Delta\log fO_2(HM)$ بین ۴- تا ۴/۴- شکل می‌گیرد (شکل ۸).

$$6CaFe^{2+}(Fe^{2+}Fe^{3+})\cdot(Si_2O_7)O(OH)\ (\text{ایلویت}) + 12SiO_2\ (\text{کوارتز}) \rightarrow 3Ca_2Fe^{2+}{}_5(Si_8O_{22})(OH)_2\ (\text{فرواکتینولیت}) + 4Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4\ (\text{مگنتیت}) + O_2$$

واکنش ۳

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

در مراحل پایانی اسکارن پسرونده با کاهش محتوای اکسیژن محیط (مقادیر $\Delta\log fO_2(HM)$ کمتر از ۴/۵-) و افزایش فعالیت X_{CO2} (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۵)، ایلویت به مجموعه کانی‌های مگنتیت، کلسیت و فرواکتینولیت تبدیل شده و در این شرایط به دلیل آزاد شدن حجم زیادی از آب در محیط، گوتیت به‌صورت یک هاله جانشینی در حاشیه مگنتیت تشکیل می‌شود. این واکنش در دمای ۲۷۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد طبق واکنش ۴ صورت می‌گیرد.

واکنش ۴

$$24CaFe^{2+}(Fe^{2+}Fe^{3+})\cdot(Si_2O_7)O(OH)\ (\text{ایلویت}) + 12CO_2 + O_2 \rightarrow 14Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4\ (\text{مگنتیت}) + 12CaCO_3\ (\text{کلسیت}) + 6Ca_2Fe^{2+}{}_5(Si_8O_{22})(OH)_2\ (\text{فرواکتینولیت}) + 6H_2O$$

در این شرایط به دلیل بالا بودن مقادیر بالای CO_2 در سیستم پیروتیت به‌صورت واکنش ۵ تشکیل شده و پس از آن زنجیره‌ای از واکنش‌های مگنتیت‌زایی مطابق واکنش‌های ۶ و ۷ در کانسار غلام‌آباد شکل گرفته است.

واکنش ۵

$$FeS_{1+x} + (2x)CO_2 \rightarrow FeS + (2x)CO + (x)SO_2$$

واکنش ۶

$$3Fe_7S_8 + 28CO_2 \rightarrow 7Fe_3O_4 + 12S_2 + 28CO$$

واکنش ۷

$$Fe_9S_{10} + 12CO_2 \rightarrow 3Fe_3O_4 + 5S_2 + 12CO$$

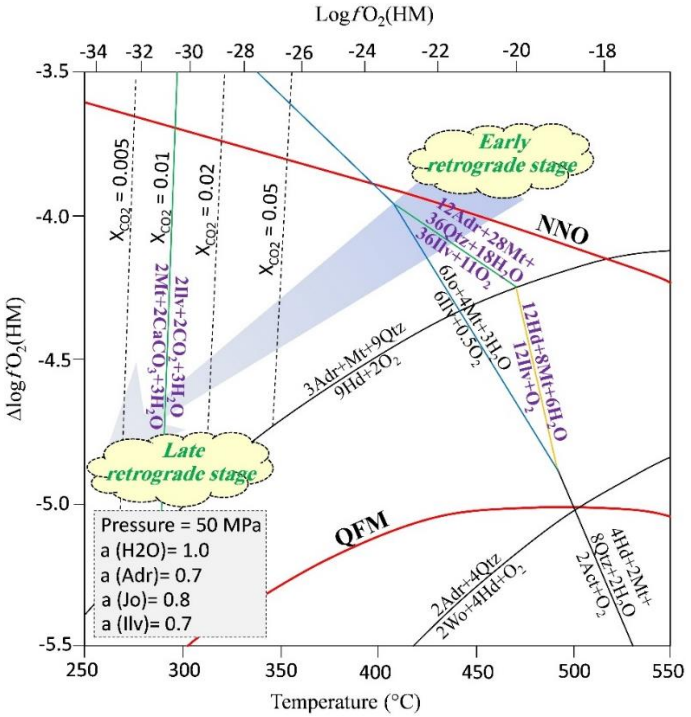
در مجموع، طبق مدل ترمودینامیکی ارایه شده در این پژوهش، رخداد ایلویت در کنار کانی‌های اسکارن-ساز می‌تواند تکامل مرحله دگرسانی پسرونده را با دقت قابل قبولی به نمایش گذارد.

مقایسه شیمی ایلویت در ذخایر اسکارن

حساسیت ترکیب ایلویت به تغییر شرایط، یکی از مزیت‌های بالقوه این کانی برای نشان دادن خصوصیات ژئوشیمیایی محیط تشکیل کانسار است (Franchini et al., 2002). شیمی ایلویت به شدت تحت تأثیر سنگ میزبان، سیال ماگمایی-گرمابی و ترکیب کانی‌شناسی اسکارن پیشرونده قرار دارد. تجزیه‌های ریزکاوالکترونی وجود ادخال‌های فراوان مگنتیت در پیروتیت و در همرشدی مگنتیت- پیروتیت از شواهد پتروگرافی این واکنش‌ها محسوب می‌شود (شکل ۴-e).

ایلویت از ذخایر اسکارن آهن (نظیر Black Perry Mountain، Artikutza و Iron Hill)، روی-سرب (نظیر Ban Ban و Groundhog) و قلع-تنگستن (نظیر Lindsay Mountain) توسط مطالعات فرانچینی و همکاران (Franchini et al., 2002) با ترکیب این کانی در کانسار آهن غلام‌آباد مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۹). نمودار ترکیب ایلویت برای ذخایر اسکارن مهم در جهان نشان می‌دهد که نقاط ترسیم شده در حوضه‌های متمایزی متمرکز می‌شوند (شکل‌های ۹ و ۱۱).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



شکل ۸- نمودار دما در مقابل $\log fO_2$ برای سیستم Ca-Fe-Si-O-H-C (Berman, 1988). نمودار بر مبنای واحد فعالیت فازهای کانی‌شناسی ایلویت (۰/۷)، فرواکتینولیت (۰/۸) و آندرادیت (۰/۷) ترسیم شده است. خطوط فرضی که در آن CO_2 یک واکنش‌دهنده می‌باشد برای مقادیر X_{CO2} مختلف رسم شده است. محور x بالای نمودار، مقادیر لگاریتم فوگاسیته اکسیژن ($\log fO_2$) را در بافرینگ هماتیت-مگنتیت (HM) نشان می‌دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال ($\Delta\log fO_2$) توسط بافرینگ HM را نشان می‌دهد (Martin and Delgado, 2010). واکنش‌های مربوط به ایلویت به‌صورت خطوط پررنگ نشان داده شده است. خط‌چین و خط ممتد قرمز به ترتیب معرف بافرینگ کوارتز-فایالیت-مگنتیت (QMF) و اکسید نیکل-نیکل (NNO) است. فلش آبی رنگ مسیر فرضی تحول fO_2 را در طول توسعه اسکارن غلام‌آباد نشان می‌دهد. فشار تجربی اعمال شده برای مدل ترمودینامیکی در نظر گرفته شده (P_H=P_L=50 مگاپاسکال) با فشار اغلب سیستم‌های اسکارن منطبق است.

Fig. 8. Temperatures−$\log fO_2$ diagram for the Ca-Fe-Si-O-H-C system (Berman, 1988). The diagram is constructed for unit activity of mineral phases for ilvaite (0.7), ferro-actinolite (0.8), and andradite (0.7). The line for the reaction in which CO_2 is a reactant is drawn for three values of X_{CO2}. The outer top *x*-axis shows the values of oxygen fugacity in the hematite-magnetite (HM) buffer; the fO_2 scale on the *y*-axis is normalized oxygen ($\Delta\log fO_2$) with respect to the HM buffer (Martin and Delgado, 2010). Reactions involving ilvaite are shown in bold; dotted red lines correspond to the indicated mineral buffers (QFM: quartz-fayalite-magnetite; NNO: nickel-nickel oxide). The blue arrow indicates the postulated trajectory of fO_2 during Gholamabad skarn development. An empirical pressure of *P*f=*P*s=50 MPa is assumed for the thermodynamic model, which is paralleled with that of most skarn systems.

در شکل ۹ محتوای FeO و MnO ایلویت در انواع مختلف اسکارن نشان داده شده است. ایلویت اغلب به‌صورت بلوری، رگه‌ای یا افشان در کربنات‌ها (عمدتاً سنگ آهک) (Misra, 2000) و به‌میزان کمتر در سنگ‌های مافیک (Barton and Bergen, 1984; Wang, 1994) وجود دارد. تشکیل این کانی مرتبط با شرایط پنوماتولیتی یا دگرسانی‌های گرمابی نسبت داده شده که بر این اساس به‌عنوان یک کانی شاخص در شناسایی شروع دگرسانی پسرونده در ذخایر اسکارن محسوب می‌شود (Graser et al., 2008). ایلویت در ذخایر

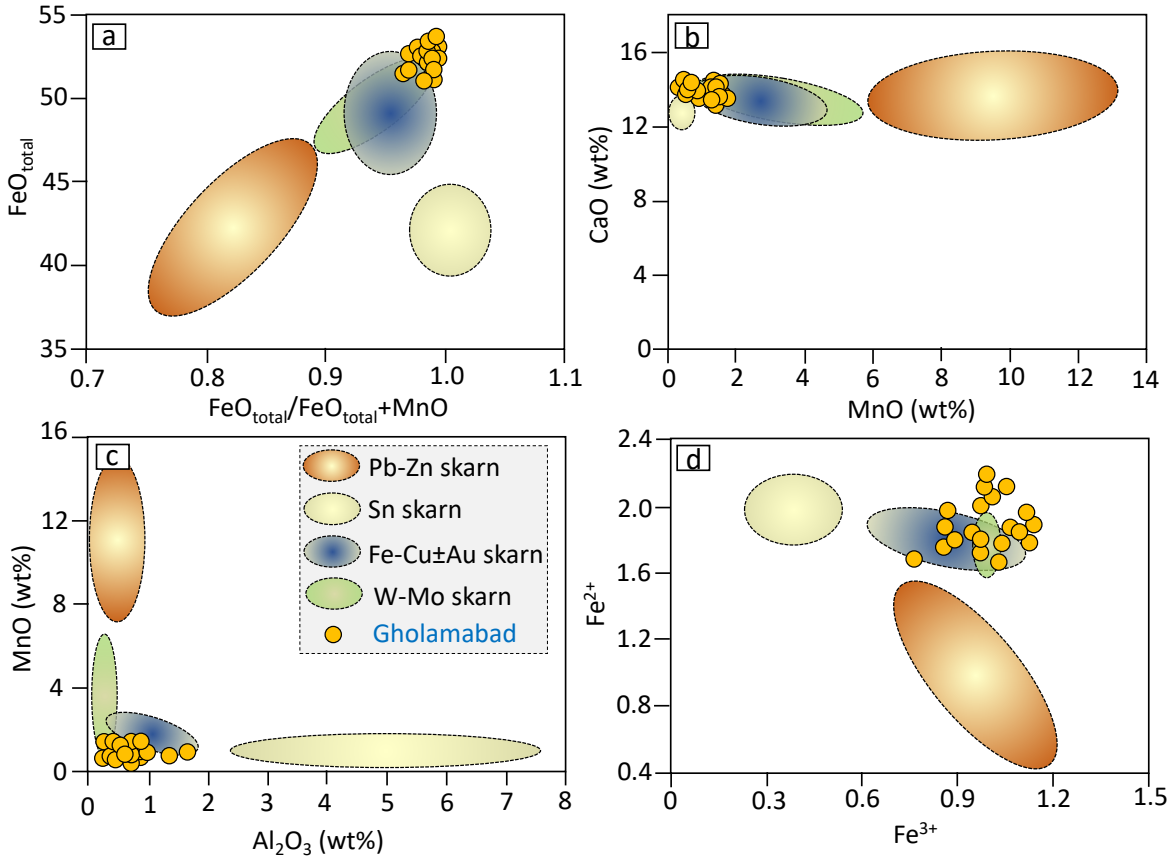
[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

اسکارن آهن از نظر ترکیب شیمیایی با ایلویت سایر اسکارن‌های Au، Fe-Pb-Zn، Pb-Zn و Sn متفاوت است. این اختلاف ترکیبی به‌ویژه در خصوص عناصر آهن، منگنز، منیزیم، تیتانیوم و آلومینیوم به‌طور بارزتری نمود دارد که در ادامه به تفکیک در خصوص هر یک از آنها بحث شده است.

مقایسه غلظت آهن: ایلویت در اسکارن‌های قلع دارای کمترین محتوای Fe^{3+} نسبت به سایر اسکارن‌ها بوده، و محتوای آهن کل آن بین اسکارن‌های روی و طلا-آهن قرار دارد. به‌نظر می‌رسد غنی‌شدگی نسبی آهن ایلویت در اسکارن‌های طلا و آهن ناشی از افزایش فوگاسیته اکسیژن سیال گرمابی باشد. علاوه بر این، طبق مطالعات مینرت (Meinert, 1998) این غنی-شدگی با محتوای بالای Fe^{2+} سایر کالک‌سیلیکات‌ها در اسکارن‌های آهن مرتبط است که طی آن کانی‌های اسکارن‌ساز حاوی پیروکسن غنی از Fe^{2+} و گارنت غنی از Fe^{3+} هستند. ایلویت در ذخایر اسکارن آهن اغلب همزمان با کانی‌های آمفیبول و مگنتیت و یا همراه پیروکسن‌های غنی از آهن رشد می‌کند که موجب می-شود محتوای آهن بالاتری نسبت به اسکارن‌های روی-سرب نشان دهند. در تشابه با فراوانی Fe^{3+}، محتوای Fe^{2+} ایلویت در اسکارن‌های Au و Fe نسبت به اسکارن‌های روی-سرب بیشتر است (به‌دلیل جایگزینی Mn^{2+} در جایگاه Fe^{2+}). همچنین، محتوای Fe^{3+} ایلویت در ذخایر اسکارن قلع-تنگستن به‌دلیل شرایط احیایی این ذخایر در مقایسه با ذخایر اسکارن Au و Fe کمتر است (شکل ۹-d).

مقایسه غلظت منگنز: ایلویت در اسکارن‌های روی-سرب با محتوای MnO بالا (بیش از ۵ درصدوزنی) مشخص می‌شود که به آن ایلویت منگنزدار یا منگانوایلویت اطلاق می‌شود (Bonev et al., 2005) (شکل ۱۰-a و b). افزایش محتوای منگنز در ترکیب ایلویت اسکارن‌های روی-سرب احتمالاً به‌دلیل دمای کمتر این ذخایر نسبت به اسکارن‌های آهن بوده که این یک ویژگی شاخص در اسکارن‌های روی-سرب دور از منشاء یا Distal است (نظیر کانسار Groundhog: Meinert, 1987). مطالعات تجربی ناکانو (Nakano, 1998) نشان می‌دهد که نسبت Mn/Fe^{2+} بالا در پیروکسن و Fe^{3+} بالا در گارنت منعکس کننده شرایط نسبتاً اکسیدان برخی از اسکارن‌های روی-سرب است. با توجه به تنوع سنگ دیواره و حالت‌های اکسیداسیون مختلف سیستم‌های اسکارنی حاوی ایلویت، به‌نظر می‌رسد کنترل‌کننده اصلی مقدار Mn^{2+} جانشین شده در سایت Fe^{2+}، ترکیب سیال گرمابی باشد. به همین دلیل در ذخایر اسکارن آهن، عناصر منگنز و سیلیس در کانی ایلویت رابطه معکوس با یکدیگر نشان می‌دهند که در کانسار غلام‌آباد صادق است (شکل ۱۰-c). محتوای کم منگنز ایلویت در اسکارن قلع-تنگستن با محتوای پایین MnO در توده نفوذی و کانی‌های اسکارن پیشرونده انطباق دارد (Kwak, 1983).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

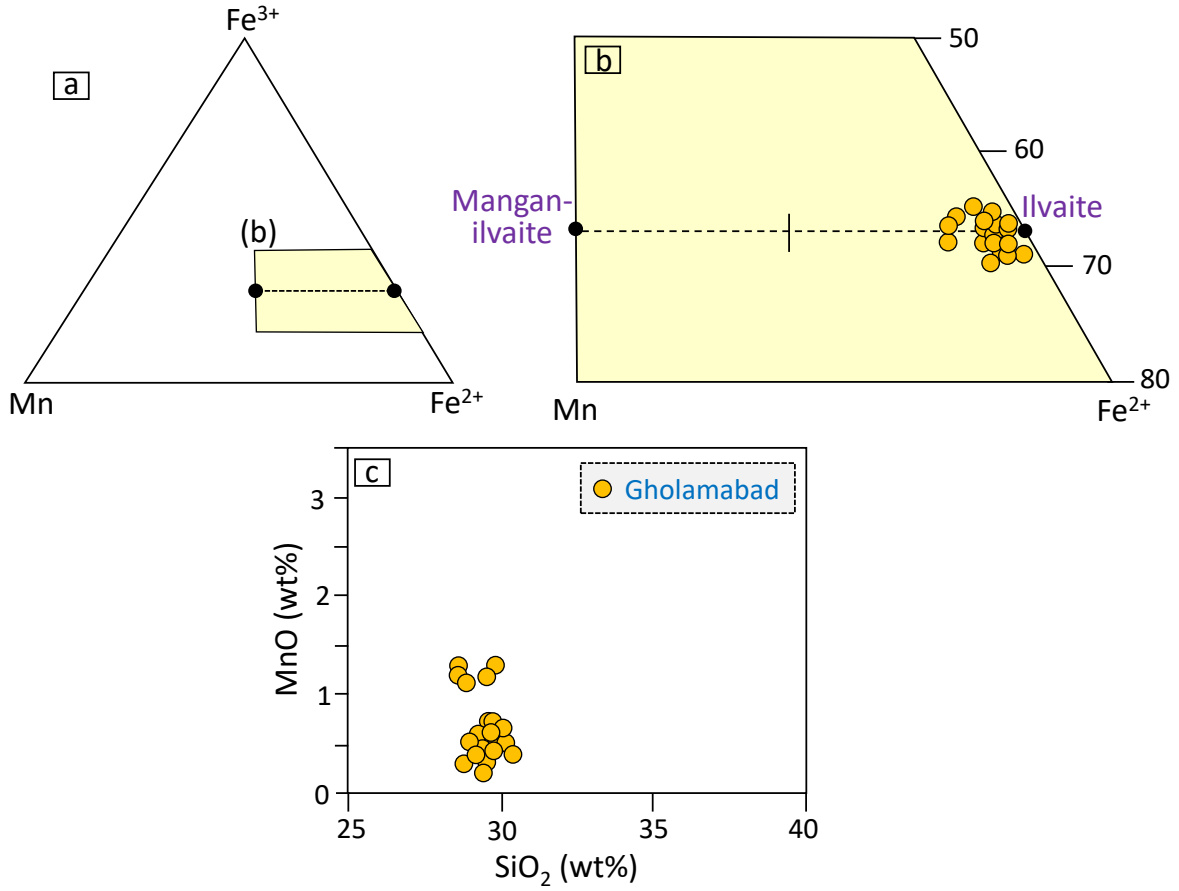


شکل ۹- نمودارهای دوتایی نسبت‌های مختلف عناصر اصلی برای ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد. a) نمودار FeO_T در مقابل $FeO/(FeO_T + MnO)$. b) نمودار CaO در مقابل MnO. c) نمودار MnO در مقابل Al_2O_3. d) نمودار Fe^{2+} در مقابل Fe^{3+}. نمودار پایه از جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2020).

Fig. 9. Binary plots of different major element ratios for ilvaite from the Gholamabad Fe deposit. a) FeO_T vs. $FeO/(FeO_T + MnO)$ diagram. b) CaO vs. MnO diagram. c) MnO vs. Al_2O_3 diagram. d) Fe^{2+} vs. Fe^{3+} diagram. Diagrams adopted from Jiang et al. (2020).

مقایسه غلظت منیزیم: محتوای MgO در ترکیب ایلویت اغلب از تجزیه سیلیکات‌های منیزیم‌دار طی دگرسانی پیشرونده تامین می‌شود که آزاد شدن Mg^{2+} در دمای تقریبی ۴۵۰ °C و فشار پایین (کمتر از ۵۰ مگاپاسکال) اتفاق می‌افتد. طبق نمودار شکل ۸ این شرایط محیطی با حوضه پایداری ایلویت سازگار است. مقایسه تجزیه ریزکاوالکترونی ایلویت در ذخایر اسکارن طلا حاکی از بالا بودن آهن و پایین بودن محتوای MgO در این ذخایر نسبت به اسکارن‌های روی-سرب بوده که از این نظر قابل مقایسه با اسکارن‌های آهن است. اگرچه محتوای MgO در اسکارن‌های طلا بسیار کمتر از اسکارن‌های آهن است. بر این اساس، با توجه به محتوای پایین MgO (کمتر از ۱ درصدوزنی) در ایلویت‌های کانسار غلام‌آباد احتمال رخداد فلز ارزشمند طلا در این کانسار دور از انتظار نیست.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]



شکل ۱۰- بررسی ترکیب ایلویت در کانسار آهن غلام‌آباد. a و b) نمودار سه‌تایی $Mn–Fe^{2+}–Fe^{3+}$. c) نمودار دوتایی $SiO_2–MnO$. نمودار پایه از بونو و همکاران (Bonev et al., 2005).

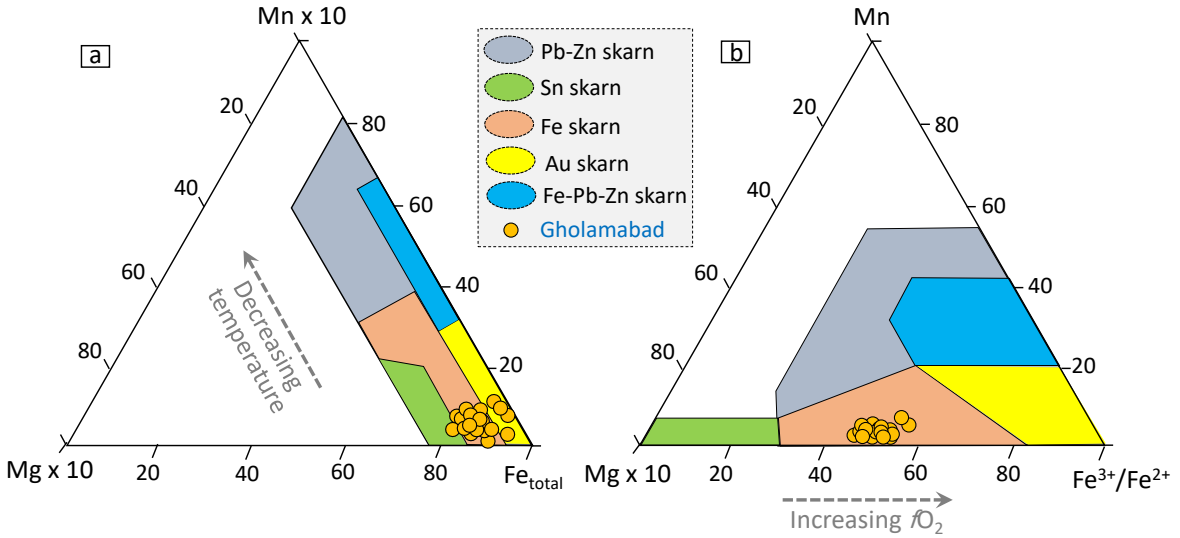
Fig. 10. Composition of ilvaite from the Gholamabad Fe deposit. a and b) ternary plot of $Mn–Fe^{2+}–Fe^{3+}$. c) binary plot of $SiO_2–MnO$. Diagrams adopted from Bonev et al. (2005).

مقایسه غلظت تیتانیوم و آلومینیوم: ایلویت در اسکارن‌های Fe، Au و Zn دارای مقادیر کمی از TiO_2 و Al_2O_3 در مقایسه با ایلویت در اسکارن‌های Sn-W-F (Be) است. محتوای TiO_2 و Al_2O_3 کانی ایلویت رابطه معکوس با محتوای این عناصر در توده‌های نفوذهای مرتبط دارد (Meinert, 1995). محتوای Al_2O_3 بالای ایلویت در اسکارن‌های قلع-تنگستن احتمالاً به‌دلیل حضور فلور در ساختار بلوری آن است. بر اساس اصل اجتناب F-Fe روزنبرگ و فویت (Rosenberg and Foit, 1977)، الکترونگاتیوی بسیار بالای فلور بر زوایای پیوند عناصر اطراف مانند آهن تأثیر گذاشته، به‌طوری که آلومینیوم بهتر می‌تواند در ساختار بلوری ایلویت غنی از فلور جایگزین شود. همچنین عناصر Al، Ti و Sn موجود در ایلویت ذخایر اسکارن قلع-تنگستن احتمالاً جایگزین سایت‌های آهن در این کانی شده‌اند. در صورتی که مجموع عناصر Al، Ti و Sn به کل آهن ترکیب شیمیایی ایلویت اضافه شوند، مقادیر حاصل

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

شبیه به کل آهن ایلویت در اسکارن‌های Au و Fe می‌شود.

سایر عناصر دیگر در ترکیب ایلویت (نظیر MgO، SiO_2 و CaO) تغییرات متنوعی را در یک رده اسکارن و همچنین در یک ذخیره اسکارن نشان می‌دهند، اما به‌نظر می‌رسد فاقد هر گونه ارتباط ژنتیکی با نوع اسکارن مورد نظر داشته باشند.



شکل ۱۱- نمودار سه‌تایی تجزیه ریزکاو الکترونی ایلوایت در کانسار آهن غلام‌آباد در مقایسه با ذخایر مختلف اسکارن. a) نمودار سه‌تایی Fe_{tot}–Mn*10–Mg*10. b) نمودار سه‌تایی Fe^{2+}/Fe^{3+}–Mn–Mg*10. نمودارهای پایه از میاو و همکاران (Miao et al., 2019).

Fig. 11. Ternary plot of microprobe analyses of ilvaite from the Gholamabad Fe deposit compared to various skarn deposits. a) ternary plot of Fe_{tot}–Mn*10–Mg*10. b) ternary plot of Fe^{2+}/Fe^{3+}–Mn–Mg*10. Diagrams adopted from Miao et al. (2019).

نتیجه‌گیری

اگرچه ایلویت با ترکیب کلی $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ یک کانی کمیاب محسوب می‌شود، اما فرمول پیچیده و تنوع ترکیبی آن، این کانی را به یک شاخص ژئوشیمیایی ارزشمند برای تبیین محیط ژنتیکی و ترمودینامیکی ذخایر معدنی به‌ویژه اسکارن‌ها تبدیل می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تغییرات سیستماتیک معناداری در ترکیب ایلویت رده‌های مختلف اسکارن وجود دارد. ایلویت کانسار غلام‌آباد از نظر ترکیب مشابه ایلویت در اسکارن‌های آهن بوده و تا حدود زیادی به ترکیب ایلویت در اسکارن‌های طلا نیز تشابه دارد. محتوای بالای FeO (متوسط ۵۲/۵۱ درصدوزنی) و نسبت بالای Fe^{+2}/Fe^{+3} (متوسط ۱/۹۰) در ترکیب ایلویت‌های کانسار غلام‌آباد به‌معنای فعالیت بالای آهن و fO_2 کم سیال بوده که از این نظر مشابه توده‌های نفوذی میزبان می‌باشد. ایلویت در اسکارن‌های Fe و Au حاوی آهن بیشتر و منگنز کمتری نسبت به ایلویت در اسکارن‌های Zn-Pb است که احتمالاً در شرایط با fO_2 بالاتر تشکیل شده‌اند. ایلویت در اسکارن‌های Sn دارای کمترین منگنز و Fe^{+3} بین انواع اسکارن است. علاوه بر این، مقادیر بالای Al_2O_3 و TiO_2 و همچنین وجود عناصر فرعی F و Sn

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

در ترکیب ایلویت، به وضوح ذخایر اسکارن قلع را از سایر ذخایر اسکارن متمایز می‌نماید.

قدردانی

تامین مالی این مقاله توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از همکاری دکتر Jose Manuel از دانشگاه سالامانکا برای آماده‌سازی و انجام XRD صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین، از داوران نشریه علوم زمین خوارزمی کمال تشکر را دارد.

References

Aghanabati, A., 1998. Major sedimentary and structural units of Iran (map). Geosciences. 7 (1), 29-30.

Atkinson, W.W., Einaudi, M.T., 1978. Skarn formation and mineralization in the contact Aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. Economic Geology. 73 (7), 1326-1365.

Azizi, H., Asahara, Y., Mehrabi, B., Chung, S.L., 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of High-K granite from the Suffiabad area, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. Chemie der Erde. 71 (6), 363-376.

Azizi, H., Nouri, F., Stern R. J., Azizi, M., Lucci, F., Asahara, Y., Zarinkoub, M.H., Chung, S. L., 2020. New evidence for Jurassic continental rifting in the northern Sanandaj Sirjan Zone, western Iran: the Ghalaylan seamount, southwest Ghorveh. International Geology Review. 62 (4), 1-23.

Barton, M., Bergen, M.J., 1984. Secondary ilvaite in a dolerite dyke from Rogaland, SW Norway. Mineralogical Magazine. 48 (348), 449-456.

Berberian, F., Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran, In: Zagros, Hindukush, Himalaya Geodynamic Evolution, Eds. Gupta, H.K., Delany, F.M., AGU, 5-32.

Berman, R.G., 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2. Journal of Petrology. 29 (2), 445-522.

Bonev, I.K., Vassileva, R.D., Zotov, N., Kouzmanov, K., 2005. Manganilvaite, $CaFe^{2+}Fe^{3+}(Mn, Fe^{2+})(Si_2O_7)O(OH)$, a new mineral of the ilvaite group from Pb-Zn skarn deposits in the Rhodope Moutntains. Bulgaria. Canadian Mineralogist. 43 (5), 1027-1042.

Chukhrov, F.V., ed. 1979. Ilvaite. *In* Minerals Handbook III–1. Nauka, Moscow, Russia 692-709.

Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. Economic Geology 75th anniversary, 317–391.

Finger, L., Hazen, R.M., Hughes, J.M., 1982. Crystal structure of monoclinic ilvaite: Carnegie Institution of Washington Yearbook. 81 (3), 386-388.

Franchini, M.B., Meinert, L.D., Valles, J.M., 2002. First occurrence of ilvaite in a gold skarn deposit. Economic Geology. 97 (5), 1119-1126.

Gaines, R.V., Skinner, H.C.V., Foord, E.E., Mason, B. Rosenzweig, A. 1997. Dana's New Mineralogy (8th ed.). Wiley, New York, N.Y.

Ghose, S., Hewat, A.W., Marezio, M., 1984. A neutron powder diffraction study of the crystal and magnetic structures of ilvaite from 305 to 5K—a mixed valence iron silicate with an electronic transition: Physics and Chemistry of Minerals. 11 (6), 67-74.

Ghose, S., Sen Gupta, P.K., Schlemper, E.O., 1985. Electron ordering in ilvaite, a mixed-valence iron silicate: Crystal structure refinement at 138K. American Mineralogist. 70 (6), 1248-1252.

Graser, G., Markl, G., 2008. Ca-rich ilvaite–epidote–hydrogarnet endoskarns: A record of late magmatic fluid influx into the persodic Ilímaussaq complex, South Greenland. Journal of Petrology. 49 (4), 239-265.

Gustafson, W.I., 1974. The stability of andradite, hedenbergite, and related minerals in the system Ca-Fe-Si-O-H. Journal of Petrology. 15 (4), 455-496.

Jiang, J., Gao, S., Zheng, Y., Lentz, D.R., Huang, J., Liu, J., Tian, K., Jiang, X., 2020. Geological, Geochemical, and Mineralogical Constraints on the Genesis of the Polymetallic Pb-Zn-Rich Nuocang Skarn Deposit, Western Gangdese, Tibet. Minerals. 10 (10), 839.

Kwak, T.P., 1983. The geology and geochemistry of the zoned, Sn-W-F-Be skarns at Mt. Lindsay, Tasmania, Australia. Economic Geology. 78 (3), 1440-1465.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]

Larsen, A.O., Dahlgren, S., 2002. Ilvaite from the Oslo Graben, Norway. Neues Jahrb. Mineral., Monatsh., 169-181.

Martin, J., and Delgado, A., 2010. Ilvaite stability in skarns from the northern contact of the Maladeta batholith, Central Pyrenees (Spain). European Journal of Mineralogy. 22 (3), 363-380.

Meinert, L., Hedenquist, J.W., Satoh, H., Matsuhisa, Y., 2003. Formation of anhydrous versus hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids. Economic Geology. 98 (7), 147-156.

Meinert, L.D., 1987. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central Mining district, New Mexico. Economic Geology. 82 (6), 523-545.

Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada. 19 (5), 145-162.

Meinert, L.D., 1998. A review of skarns that contain gold, *in* Lentz, D.R., ed., Mineralized intrusion-related skarn systems: Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 26 (5), 359-414.

Miao, Y., DICK, J.M., Jing-wen, M., Cheng-you, F., Bin, L., An-huai, L., Yong-feng, Z., Jian-qing, L. 2019. Ilvaite as a thermodynamic recorder of multistage retrograde alteration in large Galinge skarn Fe deposit, western China. Journal of Central South University, 26 (12), 3534-3550.

Misra, K.C., 2000. Understanding mineral deposits. Netherlands: Springer, 857p.

Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. International Geology Reviews. 56 (3), 263-287.

Nakano, T., 1998. Pyroxene geochemistry as an indicator for skarn metallogenesis in Japan, *in* Lentz, D.R., ed., Mineralized intrusion-related skarn systems: Mineralogical Association of Canada Short Course Series. 26 (3), 147-167.

Rosenberg, P.E., Foit, F.F., 1977. Fe^{2+}-F avoidance in silicates. Geochemica et Cosmochimica Acta, 41 (11), 345-346.

Sarjoughian, F., Pourkarim, S., Esmaeili, R., Ao, S., Xiao W., Lentz D.R., 2022. Bulk chemistry and Hf isotope ratios of the Almogholagh intrusive complex, western Iran: a consequence of an extensional tectonic regime in the Late Jurassic. International Geology Review. 65 (11), 1878-1899.

Sartipi, H., 2005. Geology Map of Sanandaj. Scale 1/100000. Geology Survey of Iran, Iran.

Sepehr Sanat Asia., 2020. Report of exploration operations during exploitation in the Gholamabad iron mine. 148p. (in Persian)

Wang, Y.S., 1994. Analysis on special case of ilvaite enrichment in a certain iron deposit. Qinghai Geology. 3 (2), 19-20.

Warr, L.N., 2021. IMA–CNMNC approved mineral symbols. Mineralogical Magazine. 85, 291-320.

Yajam, S., Ghalamghash, J., 2019. A-type Granites of North Sanandaj-Sirjan zone, new observation, new classification. Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 24 (8), 221-230. (in Persian)

Zahedi, H., 1994. Geology Map of Sanandaj. Scale 1/250000. Geology Survey of Iran, Iran.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355]