

Research Article OPENOACCESS 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 Fazel¹*

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

Article historyIlvaite, CaFe22+Fe3+(Si2O7Received: 26 June 2023retrograde alteration stage	O(OH), is one of the important trace minerals in the of skarn deposits. In this contribution, by using diffraction (XRD) and electron microprobe analysis									
Accepted: 11 August 2023 retrograde alteration stage	of skarn deposits. In this contribution, by using diffraction (XRD) and electron microprobe analysis									
	diffraction (XRD) and electron microprobe analysis									
Keywords: microscopic evidence, X-ray										
Ilvaite, Fe skarn, electron microprobe analysis North (EPMA), the crystallographic	(EPMA), the crystallographic characteristics, crystal chemistry and thermodynamic									
Sanandaj-Sirjan Zone. conditions of ilvaite have bee	conditions of ilvaite have been investigated in the formation of skarn deposits. The									
Gholamabad iron skarn dep	Gholamabad iron skarn deposit (1.3 Mt with an average grade of 37.2% FeO) is									
located 30 km SW of Deh	located 30 km SW of Dehgolan, North Sanandaj-Sirjan Zone (N-SaSZ). Skarn									
formation has occurred in this	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	intrusive body and retrograde alteration of epidote-actinolite-calcite in the vicinity of									
volcanic rocks.	Ilvaite with empirical formula,									
$Ca_{0.90}Fe^{2+}{}_{1.88}Fe^{3+}{}_{0.98}Al_{0.04}Mn_0$	$_{0.04}Mg_{0.02}Si_{2.14}O_8(OH)$, formed from the reaction of									
andradite, magnetite, and	quartz minerals during retrograde alteration stage									
(temperature 400 to 470 °C a	(temperature 400 to 470 °C and $\Delta log/O_2(HM)$ between -4.2 and -4.0). Then, in the									
final stage of retrograde alter	final stage of retrograde alteration, with increasing X_{CO2} activity (0.05 to 0.005) and									
decreasing oxygen content (Δ	decreasing oxygen content ($\Delta \log fO_2(HM) < -4.5$), ilvaite has been decomposed to the									
magnetite, calcite, and ferro	magnetite, calcite, and ferroactinolite assemblage at temperature 270 to 350 °C.									
According to the results of E	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 assum	content of Mn^{2+} (<0.05 assumed six cation sum) in the ilvaite of Gholamabad deposit									
indicates that it belongs to F	indicates that it belongs to Fe skarn deposits, which is different from other skarn									
systems. In general, although	systems. In general, although ilvaite is a trace mineral in most skarn systems, the									
results of this approach show	results of this approach show that the composition and thermodynamics of ilvaite can									
be used to distinguish diff	be used to distinguish different types of skarn deposits and the evolution of									
geochemical-skarnification p	rocesses.									

Introduction

Ilvaite-a mixed-valence calcium and iron silicate with general formula a $CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ 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

*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



DOI http://doi.org/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-rav 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 CuK α_1 primary beam $(\lambda = 1.54059 \text{ Å}), 40 \text{ kV}$ 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 subjected mineral were 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 porphyrygranular 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 ΔlogfO₂(HM) between -4.2 and -4.0).

Conclusions

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 Al₂O₃ and TiO₂, 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 Western Pyrenees rocks, (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



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

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-16] DOI: 10.22034/KJES.2023.9.1.101355





👜 مجله علوم زمین خوارز می 🏢 1. Carre

دسترسی 👌 آزاد مجله علوم زمين خوارزمي Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

شيمي كاني كمياب ايلويت به عنوان ثبتكننده شرايط ترموديناميكي دگرساني يسرونده و شاخص فلززایی در تفکیک ذخایر اسکارن: مثالی از کانسار آهن در پهنه سنندج–سیرجان شمالی

ابراهيم طالع فاضل*ا

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

مد مقاله (بابویت با ترکیب (CaFey ²⁺ Fe ³⁺ (SizOy)O(OH): کانه های کمپانه معمد در مرحله دگرسانه ایسرونده ذخاند اسکار:	
	تاريخ
۱۴۰۲/۰۴/۵ محسوب می شود. در این پژوهش با استفاده از شواهد میکروسکوپی، پراش پرتو ایکس (XRD) و تجزیه ریز کاوالکترونی	دريافت:
۲۰۰۲/۱۴۰۲ (EPMA) به بررسی خصوصیات بلورشناسی، شیمی بلور و شرایط ترمودینامیکی رخداد ایلویت در تکوین یک کانسار	پذيرش:
ای کلیدی اسکارن پرداخته شده است. کانسار اسکارن آهن غلامآباد (ذخیره قطعی ۱/۳ میلیون تن و عیار متوسط ۳۷/۲ درصد	واژه ه
سکارن آهن، FeO)، در ۳۰ کیلومتری جنوبغرب دهگلان و پهنه سنندج- سیرجان شمالی، قرار دارد. اسکارنزایی در این ذخیره در	ايلويت، ا
بزکاوالکترونی، سمحل تماس آلکالی گرانیت پورفیری (ژوراسیک بالایی) و توالی سیلتسنگ توفی (تریاس- ژوراسیک) روی داده که	تجزيه ر
^{ندج–} سیر ^{جان} طبق آن دگرسانی پیشرونده آندرادیت قهوهای–هدنبرژیت نزدیک به توده نفوذی و دگرسانی پسرونده اپیدوت–	یهنه سن
اکتینولیت- ایلویت در مجاورت سنگهای آتشفشانی شکل گرفته است. ایلویت در کانسار غلامآباد با فرمول تجربی	شمالی.
Ca0.90Fe ²⁺ 1.88Fe ³⁺ 0.98Al0.04Mn0.04Mg0.02Si2.14O8(OH) طبی مراحل اولیه دگرسانی پسرونده (دمای ۴۰۰ تا C	
۴۷۰ و (Alog/O2(HM بین ۲/۲- تا ۴-) از واکنش کانیهای آندرادیت، مگنتیت و کوارتز شکل گرفته است. پس از آن	×.
در مراحل پایانی این دگرسانی (دمای ۲۷۰ تا C° ۳۵۰)، با افزایش فعالیت Xcoz (۲۰۰۵ تا ۰/۰۰۵) و کاهش محتوای	
· ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ	<u> </u>
تجزیه شده است. طبق نتایج EPMA، نسبت بالای +Fe ²⁺ /Fe (متوسط ۱/۹۰) و محتوای پایین +Mn (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

ايلويت (ilvaite) يک کاني سوروسيليکات کلسيم و آهن با ظرفیت مخلوط و ترکیب کلی

CaFe₂²⁺Fe³⁺(Si₂O₇)O(OH) می باشد 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

e.talefazel@basu.ac.ir ابراهيم طالع فاضل basu.ac.ir

استناد به این مقاله: طالع فاضل، ا. (۱۴۰۲) شیمی کانی کمیاب ایلویت به عنوان ثبت *ک*ننده 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 $(\mathbf{\hat{n}})$



شده است (Gaines et al., 1997). ایلویت مدتها به-عنوان کانی کمیاب همراه در بسیاری از ذخایر اسکارن Zn ،Fe 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). ولي وجود آن در ذخاير اسكارن ایران تاکنون گزارش نشده است. ذخایر اسکارن که از برهمکنش سنگ میزبان کربناتی و سیالات گرمابی-ماگمایی تشکیل می شوند، جایگاه مهمی برای تامین منابع آهن، مس، سرب، روی و طلا دارند. مجموعه کانیها و خصوصیات عنصری آنها در ذخایر اسکارن تحت تأثير عوامل مختلفي مانند تركيب شيميايي ماگما و سیال، سنگ دیواره یا محیط دربر گیرنده قرار دارد که می توان از آنها در ردهبندی ذخایر اسکارن استفاده کرد. اگرچه کانی های 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 خصوصيات اين ذخاير 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 به-دلیل 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.

براساس تقسیمبندیهای زمینشناسی-ساختاری ایران، منطقه مورد مطالعه در پهنه سنندج-سیرجان شمالی قرار می گیرد. در خصوص شرایط تکوین این پهنه شمالی قرار می گیرد. در خصوص شرایط تکوین این پهنه دو سناریو وجود دارد: (۱) فرورانش لیتوسفر اقیانوسی Berberian, 1981; Mohajjel and Fergusson, نئوتتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی (2014 Azizi et al., 1981; Mohajjel and Fergusson, بههمراه فعالیتهای آتشفشانی محدود (مالا بههمراه فعالیتهای آتشفشانی محدود (راه عاره ای بههمراه فعالیتهای آتشفشانی محدود (راه عاره ای به مراد فعالیتهای (2005) و برگه (2015). منطقه مورد مطالعه در نقشه چهارگوش بخش شمالی سنندج (2005 با وسعت ۲۰۰۰ کیلومترمربع 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

ژوراسیک تزریق شدهاند. این سنگها بعداً توسط واحدهای آهکی کرتاسه، نهشتههای محدود ائوسن و واحدهای کواترنری پوشیده شدهاند. بر این اساس، قديمى ترين واحد سنكى منطقه شامل سنك آهك بلورى ضخيم لايه با ميان لايههاى أتشفشاني 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-سنجى هاى U-Pb زيركن 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 كلى لايهها در اين توالى شمالغرب-جنوب شرق و میانگین میزان شیب آنها حدود ۳۵ درجه به سمت جنوب غرب است. میان لایه هایی از سنگ آهک قهوهای روشن (واحد TR_J¹) در توالی سیلتسنگ توفی واحد TR_Jts 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 كلسيت و مقادير ناچيز پيريت است. مطالعات میکروسکوپی وقوع دگرگونی مجاورتی بهصورت بافت گرانوبلاستیک و تبلور مجدد بلورهای کلسیت را تایید کردہ است. روند واحد سنگ آھک 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 غلام آباد رخنمون دارند. دگرسانی سریسیتی مهم ترین دگرسانی در تودههای نفوذی منطقه است. جهت گیری گسل ها در منطقه غلام آباد در تمام روندها دیده می شود. این گسل ها، در قسمت های کمی از محدوده باعث جدایش مرز واحدهای سنگی از یکدیگر شده، ولی به طور کلی گسل ها در این محدوده نقش مهمی در کنترل لیتولوژیکی واحدها نداشته اند.

روش پژوهش

بهمنظور دستیابی به اهداف این پژوهش، تعداد ۳۵ نمونه از پهنههای مختلف اسکارنی جمع آوری شده و مورد مطالعات يتروگرافي قرار گرفتند. مطالعات کاني-شناسی و شناسایی کانی ایلویت ابتدا توسط ميكروسكوپ نورى عبورى-بازتابى ZEISS مدل Axioplan2 انجام شد. سپس برای اطمینان از وجود این کانی، تعداد ۳ نمونه توسط فناوری پراش پرتو ایکس $CuK\alpha_1$ فیلیپس و پرتو اولیهٔ (XRD) مدل (XRD) (Å=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 ۲۵، با اندازه گام ۲۰/۰ درجه جمع آوری 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 زمین شناسی و کانی شناسی Novosibirsk روسيه، مورد تجزيه ريزكاوالكتروني (EPMA)، قرار گرفتند.



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).

(nA)، ولتاژ شتابدهنده ۲۰ کیلوولت، قطر باریکه الکترونی ۵ میکرون و زمان شمارش ۲۰ ثانیه، انجام شد. استانداردهای مورد استفاده در ریز کاوالکترونی عبارت

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

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 زمین شناسی محلی در محدوده کانسار آهن غلام آباد (شکل a-۲) سه واحد سنگی اصلی شامل (۱) توالي سنگ آهک با ميان لايه هاي آتشفشاني موسوم به سیلتسنگ توفی به سن تریاس- ژوراسیک (شکل ۲-b)، (۲) توده لوکوگرانیتی ژوراسیک بالایی (شکل C-۲) و (۳) لایههای مگنتیت به همراه کالک-سیلیکات اسکارن (شکل d-۲)، 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 ريوليتی سيليسی هستند. توده گرانيتوئيدی منطقه موسوم به گرانیت بلبان آباد متشکل از لوکوگرانیتهای آلکالن با رنگ صورتی و بافت پورفیری- گرانولار است که دارای رخنمون های محدود از سنگ های مافیک می-باشند. ترکیب این سنگها آلکالی گرانیت و سینوگرانیت یورفیری با کانیهای اصلی کوارتز، ارتوکلاز گرانوفیری و

پلاژیوکلاز بههمراه کانیهای کمیاب زیرکن، تیتانیت، مگنتیت و ایلمنیت است. طبق مطالعات یاجم و قلمقاش مگنتیت و ایلمنیت است. طبق مطالعات یاجم و قلمقاش (Yajam and Ghalamghash, 2019) ا-بلبان آباد از دو سرشت گرانیت A2-type و عوب تشکیل شده که در اثر بالاآمدگی آستنوسفر و ذوب بخشی پیسنگ ناشی از کشش حاصل از عقبگرد یا بخشی پیسنگ ناشی از کشش حاصل از عقبگرد یا افزایش شیب ورقه فرورانده پس از رژیم تکتونیکی افزایش شیب ورقه فرورانده پس از رژیم تکتونیکی مطالعات سرشت توده گرانیتی در مجاورت کانسار غلام آباد از نوع گرانیتهای اکسیدان I-type با سن ۱۴۰ تا ۱۴۹ میلیون سال ذکر شده است (Ghalamghash, 2019)

اسکارنزایی در کانسار غلام آباد در محل تماس آلکالی گرانیت پورفیری و توالی سیلتسنگ توفی شکل گرفته است (شکل ۳–۵). 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 (;2003 , یهنه بندی اسکارنی از مست 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 به صورت محدود در فصل مشترک واحد سیلت– سنگ توفی و گرانیت پورفیری مشاهده کرد.



شکل ۲- تصاویر صحرایی بخش های مختلف کانسار آهن غلام آباد. 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.

میلیمتر تا سانتیمتر تشکیل میدهد. هدنبرژیت به-صورت 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-b). فضای خالی و حفرات موجود در این واحد سنگی در مراحل بعدی توسط کانههای سولفیدی سنگی در مراحل بعدی توسط کانههای سولفیدی (شکل ۳-b). مگنتیت با بافت دانه پراکنده (شکل ۳-f) یا رگه-رگچهای در میزبان گارنت (شکل ۳-g) وجود دارد. رگه-رگچهای در میزبان گارنت (شکل ۳-g) وجود دارد. رگه- 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 ۳-۵). به طور کلی، شکل گیری مجموعه کانیهای کالک سیلیکات اسکارن در کانسار آهن غلام آباد 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 ۳–۵). نخستین کانی متبلور شده گارنت بوده که معمولاً بلورهایی با ابعاد

کانسنگهای فلزی و کالک سیلیکات اسکارن را قطع

کرده است (شکل h-۳).



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). d) 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، 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، g2؛ کوارتز، Hd؛ هدنبرژیت، Act: اکتینولیت، g4: اپیدوت، Mag؛ مگنتیت، Ill ایلویت، Cal: کلسیت، Mrc؛ مارکاسیت، Pyh

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).

كانەزايى

طبق شواهد صحرایی، دو لایهی آهندار با ضخامت متغیر ۱ تا ۱۰ متر و طول ۵۰ تا ۱۰۰ متر با ترکیب کانه مگنتیت به صورت هم امتداد و هم شیب با لایه بندی 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 لایه-های 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 Fe₂O₃ در لایههای مگنتیت کانسار غلامآباد بین ۷۲/۸۹ تا ۷۷/۶۶ درصدوزنی و سیلیس ۱۱/۱۷ تا Sepehr Sanat Asia,) درصدوزنی متغیر است (۱۲/۷۵ 2020). همچنین، محتوای فسفر (P₂O₅) و گوگرد در این لایهها به ترتیب حدود ۲۹/۰ 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 شکل گیری، 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/cm³ و سیستم تبلور اورترومبیک در نمونه (a = 8.800 Å, b = 13.019 Å, c = 5.852 Å) دستی دارای جلای سیاه صمغی مات بوده که در لبه-های نازکتر، به رنگ زرد مایل به قهوهای تا سبز-قهوه-ای مشاهده می شود (شکل ۴-۵). 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 b-۴). ایلویت در کانسار غلام آباد بهصورت بلورهای بی شکل و ابعاد ۱ تا ۳ میلیمتر در میزبان پیروتیت (شکل b-۴) و منشوری با ابعاد ۲ تا ۵ میلیمتر همراه کلسیت، هدنبرژیت و اکتینولیت (شکل c−۴ و d) تبلور يافته است. طبق شواهد SEM برخی از بلورهای ایلویت حاوی ادخالهای فراوان مگنتیت بوده (شکل e-۴) و یا توسط کانههای سولفیدی بهصورت تأخیری دربرگرفته شده است (شکل f-۴). نتایج آزمایش XRD از نمونههای بخش دگرسانی پسرونده گویای حضور ایلویت در کنار کانیهای کوارتز، اییدوت، آندرادیت و مگنتیت است (شکل ۵).



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. b) 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، IV؛ ایلویت، Cal؛ کلسیت، Mrc

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).

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 Si₂O₇ و یونهای ⁺²Ca

نقشه عنصری و شیمی بلور ایلویت ایلویت دارای فرمول استوکیومتری (OH) (Ca>{2Fe²⁺,Fe³⁺}[Si₂]O((OH) است که در آن نمادهای < >، {}، و [] بهترتیب کاتیونها را در موقعیتهای هفتگانه، هشتوجهی و چهاروجهی نشان می دهند (Ghose et al., 1985). اصلاحات ساختار هم نگهداری می شوند. محل A حاوی ⁺Fe² و ^{Fe²⁺} است، از ساختار مونوکلینیک به ساختار اور ترومبیک تغییر در حالی که محلهای B حاوی ⁺Fe²⁺ باقیمانده و مقادیر می کند (Ghose et al., 1985). جدول ۱ ترکیب کمی از ناخالصیهای ⁺Mn²⁺ هستند. ایلویت در دمای شیمیایی ایلویت در کانسار آهن غلام آباد را نشان می-اتاق مونوکلینیک بوده و بین ۳۳۳ تا ۳۴۳ درجه کلوین دهد.



Fig. 5. XRD diffractograms from retrograde alteration with ilvaite and other minerals.ی این کانی بهدلیل عدمبهترتیب جایگزین کاتیونهای $^{+2}$ و $^{+6}$ میشوند. بری این کانی بهدلیل عدمبهترتیب جایگزین کاتیونهای $^{+2}$ و $^{+6}$ میشوند. بر۲/۲۳به $^{+6}$ و حضور PG²⁺ (معمین اساس، نسبت $^{+6}$ Pe²⁺/Fe³⁺ بین ۸۵/۱ تا ۲/۲۳۰٫۹۷بین ۲/۹۸۰٫۹۷مشکلساز است. در این۰٫۹۷مشکلساز است. در این۱یلویت با فرض مجموع ۶تا ۰/۱ (متوسط ۸۹/۱) و نسبت ۵۵/۱۰ تا ۲۰۸۵ درصدوزنی۰٫۹۷مشکلساز است. در این۱یلویت با فرض مجموع ۶تا ۰/۱ (متوسط ۸۹/۱) به دست آمد (جدول ۱).۰٫۹۷مین اساس تجزیه۰٫۹۷مین اساس دورنی مقادیر Pe²⁺ (میز ۲۰۹۰) به دست آمد (جدول ۱).۰٫۹۷مین ۲۹/۴۸ درصدوزنی۰٫۹۷میزین مقادیر Pe²⁺ (میز ۲۰۹۰) درصدوزنی۰٫۹۷میزین ۲۰۰۹۰٫۹۷میزین ۲۰۹۰۰٫۹۷میزین ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۹۰۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۰میزی ۲۰۹۰۰٫۹۷میزی ۲۰۹۰۰٫۹۰میزی ۲۰۹۰۰٫۹۰میزی ۲۰۹۰</

محاسبه فرمول تجربی این کانی بهدلیل عدم محاسبه فرمول تجربی این کانی بهدلیل عدم قطعیت در نسبتهای Fe^{2+} به Fe^{2+} 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 فرمول، محاسبه شده است. بر اساس تجزیه مریزکاوالکترونی ۲۰ نقطه از این کانی در تعداد ۵ بلور مریزکاوالکترونی ۲۰ نقطه از این کانی در تعداد ۵ بلور محتلف از کانسنگ دگرسانی پسرونده و احتساب ترکیب متوسط، فرمول تجربی متوسط، فرمول تجربی Mn²⁺ ایلویتهای کانسار غلامآباد به دست آمد (جدول ۱). در این ترکیب مقادیر ناچیز Mn^{2+}

شیمی کانی کمیاب ایلویت به عنوان ثبت کننده شرایط ...

								غلام آباد.	کانسار	رونده از	سانى پس	در دگرد	ايلويت	ئی کانی	اوالكتروة	یه ریز ک	نايج تجز	یل ۱- نا	جدو	
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 ₂ O 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) oxyge	ens																		
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
FeOt/FeOt +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
PDL · balow datasti	on limit	NAT	t on alve	ad																

BDL: below detection limit; NA: not analysed.

1 All iron as FeO

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



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 عنصري منيزيم. e) نقشه عنصري منگنز. f) نقشه عنصري آلومينيوم.

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.



روابط ترمودینامیکی ایلویت در مرحله دگرسانی پسرونده



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, SiO₂, CaO, and c) rare oxide elements of MnO, Al₂O₃, and MgO. Abbreviations from Warr (2021) (Ilv: ilvaite, Pyh: pyrrhotite).

واكنش ٣

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 سولفات-ها)، یا شکل گیری در یک سیستم باز بوده که با افزودن یا حذف عناصر آهن، کلسیم و سیلیس، همراه است. در یا حذف عناصر آهن، کلسیم و سیلیس، همراه است. در مماهای بالا (۴۰۰ تا ۴۷۰ درجه سانتی گراد) و مقادیر (HM) Δlog/O₂(HM بین ۴- تا ۴/۲-، شکل گیری ایلویت از طریق ترکیب کانی های آندرادیت، مگنتیت و کوارتز مطابق واکنش ۱ رخ می دهد.

نسبت پایین PH20/Ptotal 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 کانی-های 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 شکل-گیری همه کانیها وابسته به تغییرات 20 محیط است،

$$12Ca_{3}Fe^{3+}{}_{2}Si_{3}O_{12} (\overline{Iic}(lex) + 28Fe^{2+}Fe^{3+}{}_{2}O_{4} (\overline{Airxx}) + 36SiO_{2} (\overline{Iic}(lex) + 18H_{2}O \rightarrow 36CaFe^{2+}(Fe^{2+}Fe^{3+}) \cdot (Si_{2}O_{7})O(OH) (\underline{Iic}(lex) + 11O_{2} + 10O_{2} +$$

واکنش مهمی که میتواند منجربه تشکیل ایلویت
در کانسار غلامآباد شده باشد، تجزیه هدنبرژیت بر اساس و مگنتیت در حضور آب است.
واکنش ۲ است. تصاویر پتروگرافی (شکل ۴-۵ و b) نیز

$$+ (ایلویت) (OH) (OH) (Si_2O_7)O(OH) + (A2:تیت) 8Fe2+Fe3+2O_4 (مگنتیت) 8Fe2+Fe3+2O_4 (مگنتیت) 12CaFe2+(Fe2+Fe3+) (Si_2O_7)O(OH) + (I_2Legre) (OH) (Si_2O_7)O(OH) (Si$$

$$4Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$$
(مگنتیت) + O_2

در مراحل پایانی اسکارن پسرونده با کاهش محتوای زیادی از آب در محیط، گوتیت بهصورت یک هاله اکسیژن محیط (مقادیر (HM)ک¹O2(Q2) کمتر از ۴/۵) جانشینی در حاشیه مگنتیت تشکیل میشود. این و افزایش فعالیت ۲۵۰ (۲۰۰۵ تا ۲۰۰۵)، ایلویت به واکنش در دمای ۲۷۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد طبق مجموعه کانیهای مگنتیت، کلسیت و فرواکتینولیت واکنش ۴ صورت می گیرد.

در این شرایط به دلیل بالا بودن مقادیر بالای CO₂ در سیستم پیروتیت به صورت واکنش ۵ تشکیل شده و پس از آن زنجیرهای از واکنش های مگنتیتزایی مطابق واکنش های ۶ و ۷ در کانسار غلام آباد شکل گرفته است.

- واكنش ۵
- واکنش ۶
- واکنش ۷

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 2002 .al., شیمی ایلویت به شدت تحت تأثیر سنگ میزبان، سیال ماگمایی-گرمابی و ترکیب کانیشناسی اسکارن پیشرونده قرار دارد. تجزیههای ریزکاوالکترونی

$$FeS_{1+x} + (2x)CO_2 \rightarrow FeS + (2x)CO + (x)SO_2$$
$$3Fe_7S_8 + 28CO_2 \rightarrow 7Fe_3O_4 + 12S_2 + 28CO$$
$$Fe_9S_{10} + 12CO_2 \rightarrow 3Fe_3O_4 + 5S_2 + 12CO$$

ایلویت از ذخایر اسکارن آهن (نظیر Iron Hill و Artikutza ،Mountain)، روی-سرب (نظیر Iron Hill و Artikutza ،Mountain) و قلع-تنگستن (نظیر Ban Ban و Groundhog) و قلع-تنگستن (نظیر Lindsay Mountain) توسط مطالعات فرانچینی و همکاران (2002, 100 ایتر کیب این کانی در کانسار آهن غلامآباد مورد مقایسه قرار گرفته است کانی در (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 2025-05-16]



شکل ۸- نمودار دما در مقابل log/O2 برای سیستم Berman, 1988) Ca-Fe-Si-O-H-C (ید مبنای واحد فعالیت فازهای کانی شناسی ایلویت (۲/۷)، فرواکتینولیت (۸/۷) و آندرادیت (۲/۷) ترسیم شده است. خطوط فرضی که در آن CO2 یک واکنش دهنده می باشد برای مقادیر کردی (۲/۷)، فرواکتینولیت (۸/۷) و آندرادیت (۲/۷) ترسیم شده است. خطوط فرضی که در آن CO2 یک واکنش دهنده می باشد برای مقادیر عمود کردی مختلف رسم شده است. محور x بالای نمودار، مقادیر لگاریتم فوگاسیته اکسیژن (2000) را در بافرینگ می باشد برای مقادیر کردی کردی کردی کردی (۱۹۵۷) را در بافرینگ مهاتیت-مگنتیت (۲۸۸) نشان می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را مماتیت-مگنتیت (۲۸۸) نشان می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را نشان می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را نشان می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را فران می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را فران می دهد. محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ HM را فران می دهد محور y نمودار، مقیاس لگاریتم فوگاسیته اکسیژن نرمال (2000) توسط بافرینگ ما را و خط ممتد قرمز به ترتیب معرف بافرینگ کوارتز-فایالیت-مگنتیت (QMF) و اکسید نیکل-نیکل (NNO) است. فلش آبی رنگ مسیر فرضی تحول *J0*را در طول توسعه اسکارن غلامآباد نشان می دهد. فشار تجربی اعمال شده برای مدل ترمودینامیکی در نظر گرفته شده فرضی تحول *J0*را با فشار اغلب سیستمهای اسکارن منطبق است.

Fig. 8. Temperatures–log/ O_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 CO₂ 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 *f*O₂ 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 *f*O₂ 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.

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 در شکل ۹ محتوای FeO و MnO ایلویت در انواع مختلف اسکارن نشان داده شده است. ایلویت اغلب به-صورت بلوری، رگهای یا افشان در کربناتها (عمدتاً سنگ آهک) (Misra, 2000) و بهمیزان کمتر در سنگهای مافیک (Barton and Bergen, 1984; Wang, شیمی کانی کمیاب ایلویت به عنوان ثبت کننده شرایط ...

اسکارن آهن از نظر ترکیب شیمیایی با ایلویت سایر اسکارنهای Pb-Zn ،Fe-Pb-Zn ،Au 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 ^{+Fe³⁺ نسبت به سایر اسکارنها} بوده، و محتوای آهن کل آن بین اسکارنهای روی و طلا-آهن قرار دارد. بەنظر مىرسد غنىشدگى نسبى آهن ایلویت در اسکارنهای طلا و آهن ناشی از افزایش فوگاسیته اکسیژن سیال گرمابی باشد. علاوه بر این، طبق مطالعات مينرت (Meinert, 1998) اين غني-شدگی با محتوای بالای +Fe² سایر کالکسیلیکاتها در اسکارنهای آهن مرتبط است که طی آن کانیهای اسکارنساز حاوی پیروکسن غنی از ^{+Fe} و گارنت غنی از +Fe³ هستند. ایلویت در ذخایر اسکارن آهن اغلب همزمان با کانیهای آمفیبول و مگنتیت و یا همراه پیروکسن های غنی از آهن رشد می کند که موجب می-شود محتوای آهن بالاتری نسبت به اسکارنهای روی-سرب نشان دهند. در تشابه با فراوانی Fe³⁺، محتوای Fe²⁺ ایلویت در اسکارنهای Au و Fe نسبت به اسکارنهای روی-سرب بیشتر است (بهدلیل جایگزینی در جایگاه Fe^{3+} . همچنین، محتوای Fe^{3+} ایلویت Mn^{2+} در ذخایر اسکارن قلع-تنگستن بهدلیل شرایط احیایی این ذخایر در مقایسه با ذخایر اسکارن Au و Fe کمتر است (شکل A-d).

مقایسه غلظت منگنز: ایلویت در اسکارنهای روی-سرب با محتوای MnO بالا (بیش از ۵ درصدوزنی) مشخص می شود که به آن ایلویت منگنزدار یا منگانوايلويت اطلاق مي شود (Bonev et al., 2005) (شکل ۵-۱۰ و b). افزایش محتوای منگنز در ترکیب ايلويت اسكارنهاي روى-سرب احتمالاً بهدليل دماي 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 تجربي ناكانو (Meinert, 1987 1998) نشان میدهد که نسبت Mn/Fe²⁺ بالا در پیروکسن و ^{+Fe3} 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 می رسد کنترل کننده اصلی مقدار Mn²⁺ جانشین شده در سایت Fe²⁺، ترکیب سیال گرمایی باشد. به همین دلیل در ذخایر اسکارن آهن، عناصر منگنز و سیلیس در کانی ایلویت رابطه معکوس با یکدیگر نشان میدهند که در کانسار غلام آباد صادق است (شکل ۱۰-c). محتوای کم منگنز ایلویت در اسکارن قلع-تنگستن با محتوای پایین MnO در توده نفوذی و کانیهای اسکارن ييشرونده انطباق دارد (Kwak, 1983).



شکل ۹- نمودارهای دوتایی نسبتهای مختلف عناصر اصلی برای ایلویت در کانسار آهن غلامآباد. a) نمودار FeO_T در مقابل (b .FeO/(FeO_T + MnO) نمودار CaO در مقابل C .MnO در مقابل Al₂O₃ انمودار ⁺Fe³⁺ در مقابل Fe³⁺. 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).

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. مقایسه غلظت منیزیم: محتوای MgO در ترکیب ایلویت اغلب از تجزیه سیلیکاتهای منیزیمدار طی دگرسانی پیشرونده تامین میشود که آزاد شدن "Mg²⁺ در دمای تقریبی C^o ۴۵۰ 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



شکل ۱۰- بررسی ترکیب ایلویت در کانسار آهن غلامآباد. a و b) نمودار سهتایی Fe²⁺-Fe³⁺، in یا نمودار دوتایی SiO₂-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 SiO₂-MnO. Diagrams adopted from Bonev et al. (2005).

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

مقایسه غلظت تیتانیوم و آلومینیوم: ایلویت در اسکارنهای Au ،Fe و Zn دارای مقادیر کمی از Sn-W-F و Al₂O₃ و Al₂O₅ و Sn-W-F در مقایسه با ایلویت در اسکارنهای Sn-W-F (Be) است. محتوای 2O⁵ و Al₂O₃ کانی ایلویت رابطه معکوس با محتوای این عناصر در تودههای نفوذهای مرتبط دارد (Meinert, 1995). محتوای Al₂O₃ 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 و همچنین در یک ذخیره اسکارن نشان میدهند، اما شبیه به کل آهن ایلویت در اسکارنهای Au و Fe می– بەنظر مىرسد فاقد ھر گونە ارتباط ژنتىكى با نوع شود. اسکارن مورد نظر داشته باشند. سایر عناصر دیگر در ترکیب ایلویت (نظیر MgO، SiO₂ و CaO) تغییرات متنوعی را در یک رده اسکارن Mn x 10 b Pb-Zn skarn a Sn skarn 20 20 80 Fe skarn 80 Au skarn 40 40 Fe-Pb-Zn skarn 60 60 Gholamabad 60 - Decreasing 60 temperature 40 40 80 80 20 20 Mg x 10 60 20 40 80 $\mathrm{Fe}_{\mathrm{total}}$ 20 40 60 80 Mg x 10 Fe³⁺/Fe²⁺ Increasing fO_2

شكل ١١- نمودار سهتايى تجزيه ريزكاو الكترونى ايلوايت در كانسار آهن غلامآباد در مقايسه با ذخاير مختلف اسكارن. a) نمودار سهتايى Miao et al., 2019). نمودار سهتايى Fe²⁺/Fe³⁺–Mn–Mg*10 نمودارهاى پايه از مياو و همكاران (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 Fe²⁺/Fe³⁺–Mn–Mg*10. Diagrams adopted from Miao et al. (2019).

نتيجهگيرى

اگرچه ایلویت با ترکیب کلی CaFe2²⁺Fe³⁺(Si₂O₇)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 به-ویژه 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 طلانیز تشابه دارد. محتوای بالای FeO (متوسط ۵۲/۵۱ درصدوزنی) و نسبت بالای Fe⁺²/Fe⁺³ (متوسط ۱/۹۰) در ترکیب ایلویتهای کانسار غلامآباد به معنای فعالیت بالای آهن و fO_2 کم سیال بوده که از این نظر مشابه توده های نفوذی میزبان می باشد. ایلویت در اسکارنهای Fe و Au حاوی آهن بیشتر و منگنز کمتری نسبت به ایلویت در اسکارنهای بیشتر و منگنز کمتری نسبت به ایلویت در اسکارنهای مدهاند. ایلویت در اسکارنهای Sn دارای کمترین منگنز و Fe^{+3} بین انواع اسکارن است. علاوه بر این، مقادیر بالای Sn و Al2O3 و TiO2 و محود عناصر فرعی F دکتر Jose Manuel از دانشگاه سالامانکا برای آماده-سازی و انجام XRD صمیمانه قدردانی می شود. 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 Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. Journal of Petrology. 29 (2), 445-522.
- Bonev, I.K., Vassileva, R.D., Zotov, N., Kouzmanov, K., 2005. Manganilvaite, CaFe²⁺Fe³⁺(Mn, Fe²⁺)(Si₂O₇)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.

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

- 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.

- 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 skarm 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 intrusionrelated 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. Fe²⁺-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.