



## RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/ECONG.2022.75417.1042



## The role of sulfidation of Fe-carbonate rocks in increasing gold contents at the Zarshuran deposit (northern Takab), Takab-Angouran metallogenic district

Sharareh Heshmatnia<sup>1</sup>, Ebrahim Tale Fazel<sup>2\*</sup> , Abbas Oroji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 19 February 2022

Revised: 21 August 2022

Accepted: 28 August 2022

#### Keywords

Pyrite  
Disseminated gold  
Sulfidation process  
Fe-carbonate  
Zarshuran

#### \*Corresponding author

Ebrahim Tale Fazel

✉ [e.talefazel@basu.ac.ir](mailto:e.talefazel@basu.ac.ir)

### ABSTRACT

Iron and arsenic sulfides are considered as the most important gold hosts in the sediment-hosted disseminated invisible gold deposits. The Zarshuran gold deposit (155 tons Au with average grade of 2.63 g/t) is formed in the Lower Cambrian black shale and siltstone (Zarshuran unit) and Fe-rich carbonates (Chaldagh unit) host rocks. As-sulfide (e.g., realgar and orpiment) and arsenian pyrites are the most important host minerals of gold in this deposit. Based on EPMA data, pyrite with As content below the detection limit to 3.99 wt% occurs in six different types, respectively, Py0 (gold content of 0.01 ppm), Py1 (gold content of 0.02 ppm), Py2 (gold content of 0.03 ppm), Py3 (gold content of 0.02 ppm), Py4 (gold content of 0.04 ppm), and Py5 (gold content of 0.01 ppm). According to the evidences, gold can be present as participating in chemical bounded ( $\text{Au}^+$  and  $\text{Au}^{+3}$ ) or nanoparticle inclusions ( $\text{Au}^0$ ). The weak geochemical correlation ( $R^2 = -0.6$ ) between As and S elements in pyrites indicates that there is pyrite with a complex composition  $[\text{Fe}(\text{S},\text{As})_2\text{Au}_2\text{S}^0]$ , which  $\text{As}^-$  has replaced  $\text{S}^{2-}$ . Mineralogy and the abundance of Fe and S in the rock units suggest that gold mineralization in the Zarshuran deposit is well occurs in response to sulfidation process. Sulfidation occurs when  $\text{H}_2\text{S}$ -rich ore-forming fluids react with Fe-bearing carbonate host rock to form pyrite, marcasite, and pyrrhotite minerals.

#### How to cite this article

Heshmatnia, Sh., Tale Fazel, E. and Oroji, A., 2022. The role of sulfidation of Fe-carbonate rocks in increasing gold contents at the Zarshuran deposit (northern Takab), Takab-Angouran metallogenic district. *Journal of Economic Geology*, 14(4): 89–114. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.75417.1042>



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Sediment-hosted disseminated gold deposits with high gold grade ( $> 1000$  g/t) are known to contain gold as participating in chemical bounded ( $\text{Au}^+$  and  $\text{Au}^{+3}$ ) or nanoparticle inclusions ( $\text{Au}^0$ ) in the pyrite composition (Deditius et al., 2014). The Zarshuran gold deposit (155 t @ 2.63 g/t Au; Madan-Zamin Company, 2020) is situated 35 km north of Takab in the Takab-Angouran metallogenic district, NW Iran. According to Mehrabi et al. (1999) and Asadi et al. (2000), gold mineralization in the Zarshuran deposit is in many respects like the Carlin-style and Carlin-like gold deposits, respectively. Gold substitution has been reported to be below detection limit to a maximum of 0.64 wt.% and 3 wt.% in arsenian pyrite and arsenopyrite lattice, respectively (Voute et al., 2019). Here, we examine the relationship between geochemistry and textures of pyrite, with a view to constraining the mechanism of gold precipitation. We use electron probe microanalysis (EPMA) to study the composition of different pyrite types. The results show that distribution of ferrous iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ) is controlled by the initial diagenesis of Fe-C-S systems.

### Materials and methods

During field studies, mineralization outcrops and their associated host rocks were identified. After preparing thin and thin-polished sections, mineralogical studies were carried out by transmitted and reflected polarizing ZIESS Axioplan2 microscope. To identify and classify different pyrite types and investigate the possibility of presence of gold and trace minerals, eight thin-polished sections were prepared, and carbon coated. This study was carried out by scanning electron microscope (SEM) with EVO MA15 model in the Central Laboratory of Kharazmi University (Tehran, Iran). Then, to achieve the chemical composition of different types of pyrite, 104 points were examined by EPMA (model JEOL JXA-8530F) in the Laboratory of Geo Forschungs Zentrum (GFZ). Spot analysis was performed with a voltage of 20 kV, electron beam current of 10 nA, X-ray diameter of 2  $\mu$  and radiation time of 5 to 20 seconds. The standard examples used to calibrate the various elements in this experiment were as follows:  $\text{FeS}_2$  (for Fe and S),  $\text{CoAsS}$  (for As and Co), and free gold (for Au). The detection limits of the elements are Fe (300 ppm), As (200 ppm), S (300 ppm) and Au (200 ppm). To identify rare minerals such as mackinawite ( $\text{Fe}_9\text{S}_8$ ), HR microscopic

confocal Raman technique was used in the Central Laboratory of Shiraz University (Shiraz, Iran). The experiment was performed with an X50 laser, a wavelength of 785 nm with a power of 100 mw and a radiation time of 20s.

### Results and discussion

Based on SEM and optical-microscopic studies, six types of pyrite have been identified in the Zarshuran deposit. They are (1) framboidal pyrite (Py0) (avg. = 30  $\mu\text{m}$  in diameter), (2) fine-grained disseminated pyrite (Py1) ( $< 20$   $\mu\text{m}$  in diameter), (3) coarse-grained euhedral pyrite (Py2) (avg. = 100  $\mu\text{m}$  in diameter), (4) porous/sponge pyrite (Py3) (avg. = 300  $\mu\text{m}$  in diameter), (5) colloform pyrite (Py4) (avg. = 550  $\mu\text{m}$  in diameter), (6) vein pyrites (Py5) (avg. = 55  $\mu\text{m}$  in thickness). Decalcification and sulfidation of host rocks are two important mechanisms in genesis of sediment-hosted gold deposits, and the importance of sulfidation depends on the reactivity of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{H}_2\text{S}$  rocks (Voute et al., 2019). The interaction of  $\text{H}_2\text{S}$ -rich hydrothermal fluids with reactive iron originating from the host rocks (Cail and Cline, 2001) or through hydrothermal fluids added to the environment (Reich et al., 2005) which results in formation of Au(-As)-rich pyrite. Arsenic in pyrite can occur in various oxidation states that correspond to different crystallographic sites in the lattice and different substitution mechanisms.  $\text{As}^-$  substitution for  $\text{S}^{2-}$  is found in reducing conditions and often in sediment-hosted gold deposits; while As cations ( $\text{As}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{As}^{5+}$ ) replace  $\text{Fe}^{2+}$  under oxidation conditions (Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014). The diagram of arsenic versus sulfur in the Zarshuran deposit shows that the concentration of As in the formed pyrites is strongly related to the decrease in concentration of S. Based on this, it can be concluded that As replaces S in the pyrite structure and in the form of  $\text{As}^-$ ; Moreover, As species are common in pyrites of gold deposits with sedimentary host rocks. In the Zarshuran deposit the occurrence of gold in As-Hg-Sb sulfides in late drusy quartz veins (Daliran et al., 2018) is more important than the presence of gold in various pyrites. Finally, all evidence suggest that gold mineralization in the Zarshuran deposit occurs well in response to sulfidation process of Fe-bearing carbonate rocks. The correlation between gold content and degree of sulfidation in the Zarshuran deposit indicates that sulfidation process is a much more important mechanism to gold precipitation relative to addition of pyrite (pyritization).



## بررسی نقش سولفیداسیون سنگ‌های کربناته آهن‌دار در افزایش عیار طلائی کانسار زرشوران (شمال تکاب)، ناحیه فلززایی تکاب-انگوران

شراره حشمت‌نیا<sup>۱</sup>، ابراهیم طالع فاضل<sup>۲\*</sup>، عباس اروجی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

### چکیده

سولفیدهای آهن و آرسنیک به عنوان مهم‌ترین میزبان طلا در ذخایر طلائی افشان نامرئی با سنگ میزبان رسوبی محسوب می‌شوند. کانسار طلائی زرشوران (ذخیره قطعی ۱۵۵ تن طلا و عیار متوسط ۲/۶۳ گرم در تن)، در میزبان شیل و سیلتستون سیاه (واحد زرشوران) و کربنات‌های آهن‌دار (واحد چالداغ) به سن کامبرین زیرین شکل گرفته است. کانه‌های سولفید آرسنیک (نظیر رآلگار و اریمنت) و پیریت‌های آرسنیک‌دار مهم‌ترین میزبان طلا در این کانسار هستند. بر اساس شواهد تجزیه ریز کواالکترونی، پیریت با محتوای آرسنیک زیر حد تشخیص تا ۳/۹۹ درصد وزنی در شش نوع مختلف به ترتیب شامل Py0 (محتوای طلا ۰/۰۱ ppm)، Py1 (محتوای طلا ۰/۰۲ ppm)، Py2 (محتوای طلا ۰/۰۳ ppm)، Py3 (محتوای طلا ۰/۰۲ ppm)، Py4 (محتوای طلا ۰/۰۴ ppm) و Py5 (محتوای طلا ۰/۰۱ ppm) شناسایی شد. طبق نتایج به دست آمده، طلا اغلب به صورت مشارکت شیمیایی در شبکه کانی (Au<sup>1+</sup> یا Au<sup>3+</sup>) یا ادخال‌های نانوذرات آزاد (Au<sup>0</sup>) حضور دارد. همبستگی زمین‌شیمیایی ضعیف میان عناصر S و As (R<sup>2</sup> = -۰/۶) در پیریت‌ها نشان می‌دهد که پیریت با ترکیب پیچیده [Fe(S,As)<sub>2</sub>Au<sub>2</sub>S<sup>0</sup>] وجود دارد که در آن As<sup>-</sup> جانشین S<sup>2-</sup> شده است. بررسی‌های کانی‌شناسی و فراوانی آهن و گوگرد در واحدهای سنگی کانسار زرشوران نشان می‌دهد که رخداد طلا اغلب با فرایند سولفیداسیون همراه است. سولفیداسیون زمانی رخ می‌دهد که سیالات کانه‌ساز غنی از H<sub>2</sub>S با سنگ میزبان کربناتی آهن‌دار واکنش داده و کانه‌های پیریت، مارکاسیت یا پروتیت را تشکیل دهد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

### واژه‌های کلیدی

پیریت  
طلائی افشان  
فرایند سولفیداسیون  
کربنات آهن‌دار  
زرشوران

### نویسنده مسئول

ابراهیم طالع فاضل

e.talefazel@basu.ac.ir ✉

### استناد به این مقاله

حشمت‌نیا، شراره؛ طالع فاضل، ابراهیم و اروجی، عباس، ۱۴۰۱. بررسی نقش سولفیداسیون سنگ‌های کربناته آهن‌دار در افزایش عیار طلائی کانسار زرشوران (شمال

تکاب)، ناحیه فلززایی تکاب-انگوران. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۴): ۸۹-۱۱۴. <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.75417.1042>

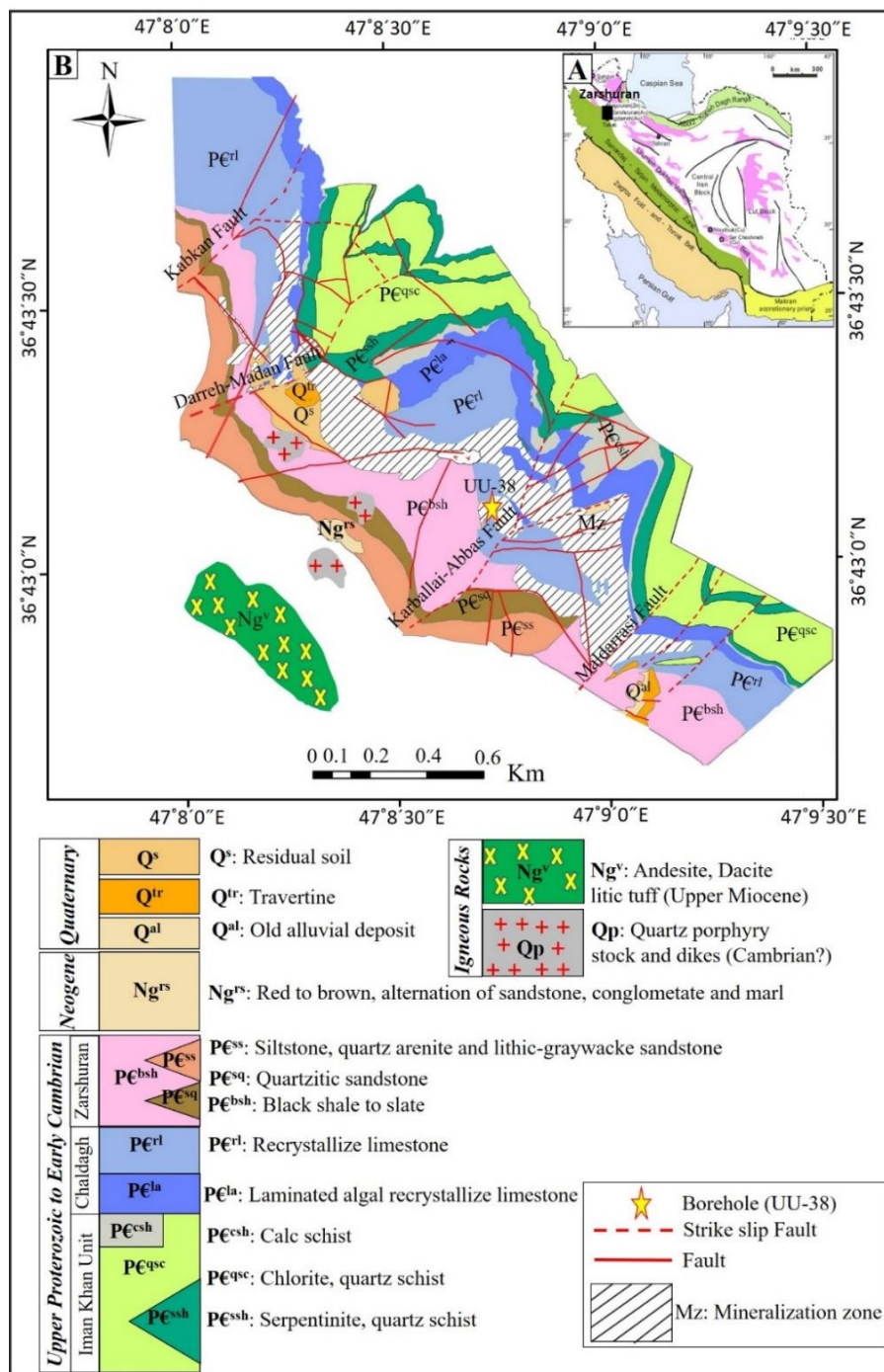
## مقدمه

سولفیدهای آهن نظیر پیریت، پروتیت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت به عنوان مهم‌ترین میزبان طلا در کانسارهای مختلف هستند (Voute et al., 2019). در این میان، کانسارهای طلا با سنگ میزبان رسوبی نظیر ذخایر طلائی نوع کارلین یا توریدایتی با مقادیر بالایی از طلا (بیش از ۱۰۰۰ گرم در تن) در ترکیب پیریت شناخته می‌شوند که طلا می‌تواند به صورت مشارکت در ترکیب شیمیایی یا ادخال‌های نانوذرات حضور داشته باشد (Palenik et al., 2004; Deditius et al., 2014). این ذخایر به طور عمده در میزبان سنگ‌های کربناتی آهن‌دار تشکیل می‌شوند و پیریت‌های طلا در صورت افشان، پرحفره یا رشد منطقه‌بندی بر روی پیریت‌های فقیر از طلائی قدیمی شکل می‌گیرند (Cline et al., 2005). طبق جدیدترین تخمین ذخیره انجام‌شده در کانسار زرشوران، عیار متوسط ۲/۶۳ گرم در تن و محتوای طلائی ۱۵۵ تن گزارش شده است (Madan-Zamin Company, 2020). بر اساس پژوهش مهرابی و همکاران (Mehrabi et al., 1999) و اسدی و همکاران (Asadi et al., 2000)، کانه‌زایی طلا در کانسار زرشوران از جنبه‌های مختلفی مشابه ذخایر طلائی نوع کارلین<sup>۱</sup> و یا شبه کارلین<sup>۲</sup>، قلمداد شده است. کانه‌های سولفیدی آهن نظیر پیریت، میزبان مناسبی برای تمرکز عناصر گران‌بهای مانند طلاست که از جنبه‌های علمی و اکتشافی دارای اهمیت فراوانی هستند. جایگزینی طلا به صورت کمیاب تا بیشینه ۰/۶۴ درصد وزنی در شبکه پیریت آرسنیک‌دار و ۳ درصد وزنی در شبکه آرسنوپیریت گزارش شده است (Voute et al., 2019). این پژوهش، به منظور تفکیک و شناسایی دقیق انواع مختلف پیریت و بررسی رابطه بین سولفیداسیون آهن احیایی و کانه‌زایی طلائی افشان در کانسار زرشوران انجام شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توزیع آهن احیایی توسط دیاژنز اولیه Fe-C-S کنترل شده است. انجام این پژوهش علاوه بر جنبه‌های علمی، نقشی مهم در شناسایی پهنه‌های سولفیداسیون و رابطه آن با شکل‌گیری طلائی افشان و ردیابی ذخایر مشابه در ناحیه تکاب-انگوران خواهد داشت.

## زمین‌شناسی منطقه زرشوران

کانسار طلائی زرشوران در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان تکاب

در محدوده‌ای به وسعت ۳۷ کیلومتر مربع و در فاصله ۷ کیلومتری روستای زرشوران واقع شده است. این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری زمین‌شناسی ایران، در پهنه سنندج-سیرجان (Alavi, 2004) قرار می‌گیرد (شکل ۱-A). قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه با عنوان واحد ایمان‌خان به سن پروتروزوئیک بالایی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی با ترکیب آمفیبول-اپیدوت شیست، سرپانتین شیست، سرسیست-کلریت شیست، کوارتز-میکاشیست و کالک‌شیست است. این واحد سنگی سنگ بستر منطقه زرشوران را تشکیل می‌دهد. پس از آن، واحد کربناتی چالداغ به سن کامبرین زیرین متشکل از آهک نازک‌لایه تبلور مجدد یافته با یک ناپوستگی بر روی سنگ بستر دگرگونی تشکیل شده است. واحد سنگی زرشوران متشکل از شیل، سیلستون و ماسه‌سنگ با مرز مشخص بر روی واحد آهکی چالداغ قرار گرفته است. واحدهای کربناتی چالداغ و شیلی زرشوران به عنوان سنگ‌های میزبان اصلی کانسار زرشوران محسوب می‌شوند (شکل ۱-B). پس از یک وقفه چینه‌شناسی عظیم به دلیل بسته‌شدن اقیانوس پروتوتیس و خروج سنگ‌های منطقه از آب طی اردوئین تا الیگوسن (Hajialioghli et al., 2011)، پیشروی دریای الیگومیوسن موجب نهشت کنگلومرای بنفش، شیل‌های میکادار و ماسه‌سنگ‌های آهکی نوژن معادل سازند قم بر روی واحدهای قدیمی تر شده است. نهشته‌های آواری معادل سازند قرمز بالایی، متشکل از تناوب‌های ماسه‌سنگ‌های آهکی قرمز، رس، مارن و کنگلومرا، جدیدترین واحد رسوبی دریایی منطقه را تشکیل می‌دهد و گدازه‌های آتشفشانی جوان از جنس آندزیت تا تراکی آندزیت با شیب ملایمی بر روی سازند قرمز بالایی قرار می‌گیرند. در نهایت عملکرد چشمه‌های آب گرم تراورتن‌ساز در برخی از مناطق رخنمون‌هایی را تشکیل داده‌اند که نشان‌دهنده فعالیت گرمایی کواترنری در منطقه هستند (Daliran, 2008). در منطقه مورد بررسی، توده‌های نفوذی نیمه عمیق در قالب استوک و دایک با جنس کوارتز پورفیری نفوذ کرده است که در نقشه‌های زمین‌شناسی محلی (Samimi, 1992)، این واحدها را معادل گرانیت دوران با سن کامبرین زیرین در نظر می‌گیرند.



شکل ۱. A: نقشه ساختاری ایران و موقعیت کانسار زرشوران، B: نقشه زمین‌شناسی کانسار زرشوران (با تغییرات از شرکت مهندسی مشاور کاوشگران Kavoshgaran Consulting Engineers, 2013) و موقعیت گسل‌های مختلف. طبق نقشه، پهنه کانه‌زایی (Mz) بین واحدهای چالداغ و زرشوران شکل گرفته است.

**Fig. 1.** A: Structural map of Iran and location of the Zarshuran deposit, B: Geological map of the Zarshuran deposit (modified after Kavoshgaran Consulting Engineers, 2013) and location of various faults. Based on map, the mineralization zone (Mz) were formed between Chaldagh and Zarshuran units.



Horiba ژاپن در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز استفاده شده است. این آزمایش با لیزر  $50X$ ، طول موج  $785$  نانومتر با توان  $100$  میلی‌وات و زمان تابش  $20$  ثانیه انجام شد. برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمی سنگ کل و بررسی سازوکار سولفیداسیون در رخداد کانه‌زایی، تعداد  $147$  نمونه سنگی از گمانه شماره UU-38 (عمق  $5$  تا  $192$  متر) با همکاری شرکت مهندسین مشاور کاوشگران برداشت شده و توسط روش تجزیه شیمیایی ICP-OES با دقت  $1$  گرم در تن (برای عناصر آهن، آلومینیم و گوگرد) و  $0.1$  گرم در تن (برای طلا) در آزمایشگاه زرشوران (تهران) مورد تجزیه قرار گرفته است. برای تخریب نمونه، مقدار  $0.5$  گرم پودر سنگ توسط اسیدهای  $HNO_3$  ( $5$  ml) و HF ( $15$  ml) حل شده و پس از حرارت دادن (دمای  $250$  تا  $290$  درجه سانتی‌گراد)، توسط دستگاه بادشده مورد آزمایش قرار گرفتند. خطای تجزیه در این روش کمتر از  $10$  گرم در تن است. این نمونه‌ها به صورت متر به متر برداشت شده و موقعیت گمانه در نقشه زمین‌شناسی **شکل ۱** نشان داده شده است.

### کانه‌زایی و دگرسانی

کانه‌زایی با وسعت تقریبی  $5$  کیلومتر مربع در سنگ‌های رسوبی پرکامبرین شامل شیل سیاه و سیلتستون واحد زرشوران، بخش بالایی سنگ آهک چالداغ و ژاسپروئیدها، با روند شمال-شمال شرقی شکل گرفته است (**شکل ۱-B**). اطلاعات سن‌سنجی با استفاده از روش‌های  $K/Ar$  و  $Ar/Ar$  بر روی دگرسانی آرژلیک و سنگ‌های آتشفشانی منطقه نشان می‌دهد که کانه‌زایی در کانسار زرشوران در  $0.4 \pm 14.2$  میلیون سال هم‌زمان با فعالیت آتشفشانی میوسن ( $2/9 \pm 13/7$  میلیون سال)، شکل گرفته است (Mehrabi et al., 1999; Daliran, 2008). بخش بالایی سنگ آهک چالداغ در اثر عملکرد سیال گرمایی اسیدی به یک سنگ آهک پودری بسیار متخلخل تبدیل شده است که در واقع یک آهک دولومیتی آهن‌دار محسوب می‌شود (**شکل ۲-A**). کانه‌زایی با ژئومتری افشان (دانه‌پراکنده)، رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و برشی با کانه‌های فلزی پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت، سولفیدهای آرسنیک (رآلگار و اورپیمنت)، اسفالریت، مگنتیت، پیروتیت، سینابر و گالن همراه است. کانی‌های باطله نیز شامل

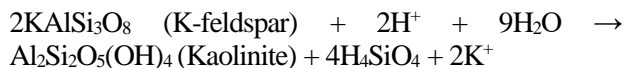
علاوه بر ترکیب سنگ میزبان، سامانه شکستگی و گسلش منطقه تکاب از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کانه‌زایی به شمار می‌رود. طبق شواهد، حرکت برشی راست‌الغز پهنه گسلی تکاب باعث تشکیل ساختارهای کششی و فشارشی در منطقه مورد بررسی شده است (Alipour et al., 2020). یکی از ساختارهای مهم تشکیل شده در این پهنه، تاقدیس ایمان‌خان است که میزبان کانسار طلائی زرشوران است. بنابراین، شکستگی‌های مرتبط با این ساختار چین‌خورده نقش مهمی در هدایت سیالات گرمایی به بخش‌های کانه‌سازی داشته‌اند. سامانه شکستگی‌های کانسار طلائی زرشوران، اغلب از نوع شکستگی‌های طولی و عرضی هستند. شکستگی‌های طولی تشکیل شده بر روی این تاقدیس دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و همچنین روند شکستگی‌های عرضی شکل گرفته دارای روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است (Alipour et al., 2020). بنابراین، چهار گسل اصلی موجود در امتداد دره‌های کبکان، دره معدن، کربلایی عباس و مالدرسی جزو شکستگی‌های عرضی با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی در تاقدیس ایمان‌خان هستند که در رخداد کانه‌زایی نقش به‌سزایی داشته‌اند (**شکل ۱-B**).

### روش مطالعه

طی بررسی‌های صحرایی، رخنمون‌های کانه‌زایی شناسایی و چگونگی ارتباط آنها با سنگ میزبان مشخص شده است. برای شناسایی و تفکیک انواع مختلف پیریت و احتمال حضور کانی‌های کمیاب و طلا، تعداد  $8$  مقطع نازک-صیقلی پس از انجام اندود کربنی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> مدل EVO MA15 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خوارزمی، مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، برای دستیابی به ترکیب شیمیایی انواع مختلف پیریت، تعداد  $104$  نقطه توسط دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی<sup>۴</sup> مدل JEOL JXA-8530F در آزمایشگاه مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان<sup>۵</sup>، آزمایش شدند. تجزیه نقطه‌ای با ولتاژ  $20$  کیلوولت، جریان پرتو الکترونی  $10$  نانوآمپر، قطر پرتو ایکس  $2$  میکرون و زمان تابش  $5$  تا  $20$  ثانیه، انجام شد. حد تشخیص عناصر عبارتند از: (ppm)  $300$  Fe،  $200$  As،  $300$  S و  $200$  Au. به منظور شناسایی فازهای سولفیدی کمیاب نظیر ماکیناویت ( $Fe_9S_8$ ) از دستگاه رامان کانفو کال میکروسکوپی مدل Lab Ram HR ساخت شرکت

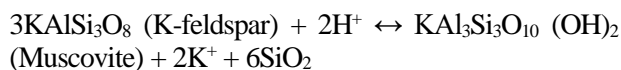
نتیجه تسریع ته‌نشست فلزات کانسار سازی می‌شود.

واکنش (۲):



**دگرسانی سریستی:** این دگرسانی حاصل خروج عناصری نظیر سدیم، کلسیم و منیزیم از سنگ‌های آلومینوسیلیکاتی و ورود پتاسیم و یا به کار گرفته شدن پتاسیم مربوط به فلدسپات‌های موجود در سنگ برای تشکیل میکای دانه ریز و گاه فیبری (سریست) اتفاق می‌افتد. یک منبع مهم  $\text{K}^+$ ، فرایند کلریتی شدن بیوتیت‌هاست (Zhou and Wang, 2003). مجموعه کانی‌های موجود در این دگرسانی، سریست، کوارتز و پیریت هستند. این دگرسانی در اغلب سنگ‌های منطقه مشاهده می‌شود (شکل ۳-C). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی در منطقه زرشوران، کانی‌شناسی اصلی در این زون شامل سریست بوده که اغلب از دگرسانی پلاژیو کلاز به وجود آمده است. تشکیل سریست طبق واکنش (۳) شکل گرفته است:

واکنش (۳):

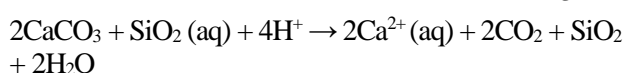


**دگرسانی کربنات‌زدایی:** نوع دیگر دگرسانی‌های موجود در منطقه زرشوران، دگرسانی کربنات‌زدایی است که به طور وسیع در منطقه قابل مشاهده است (شکل ۳-D). این دگرسانی در اثر عملکرد محلول‌های حاوی کربنات یا  $\text{H}_2\text{CO}_3$  و واکنش آن با سنگ‌های دربرگیرنده تشکیل می‌شود. دگرسانی کربنات‌زدایی در اغلب سنگ‌های رسوبی کربناته رایج است؛ زیرا محلول‌های موجود در منطقه در اثر حل کردن کربنات و سپس تغییر pH درون سنگ‌های غیر کربناته باعث تشکیل کلسیت‌های ثانویه می‌شوند. فرایند کربنات‌زدایی اغلب در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌ها رخ داده است. دگرسانی کربنات‌زدایی در کل منطقه زرشوران به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی برای رخداد کانه‌زایی و افزایش عیار ذخیره شناخته می‌شود. پس از رخداد کربنات‌زدایی، یون  $\text{Fe}^{2+}$  آزاد شده و با  $\text{H}_2\text{S}$  محیط واکنش می‌دهد و به تشکیل پیریت، تحت فرایند پیریتی شدن منجر می‌شود.

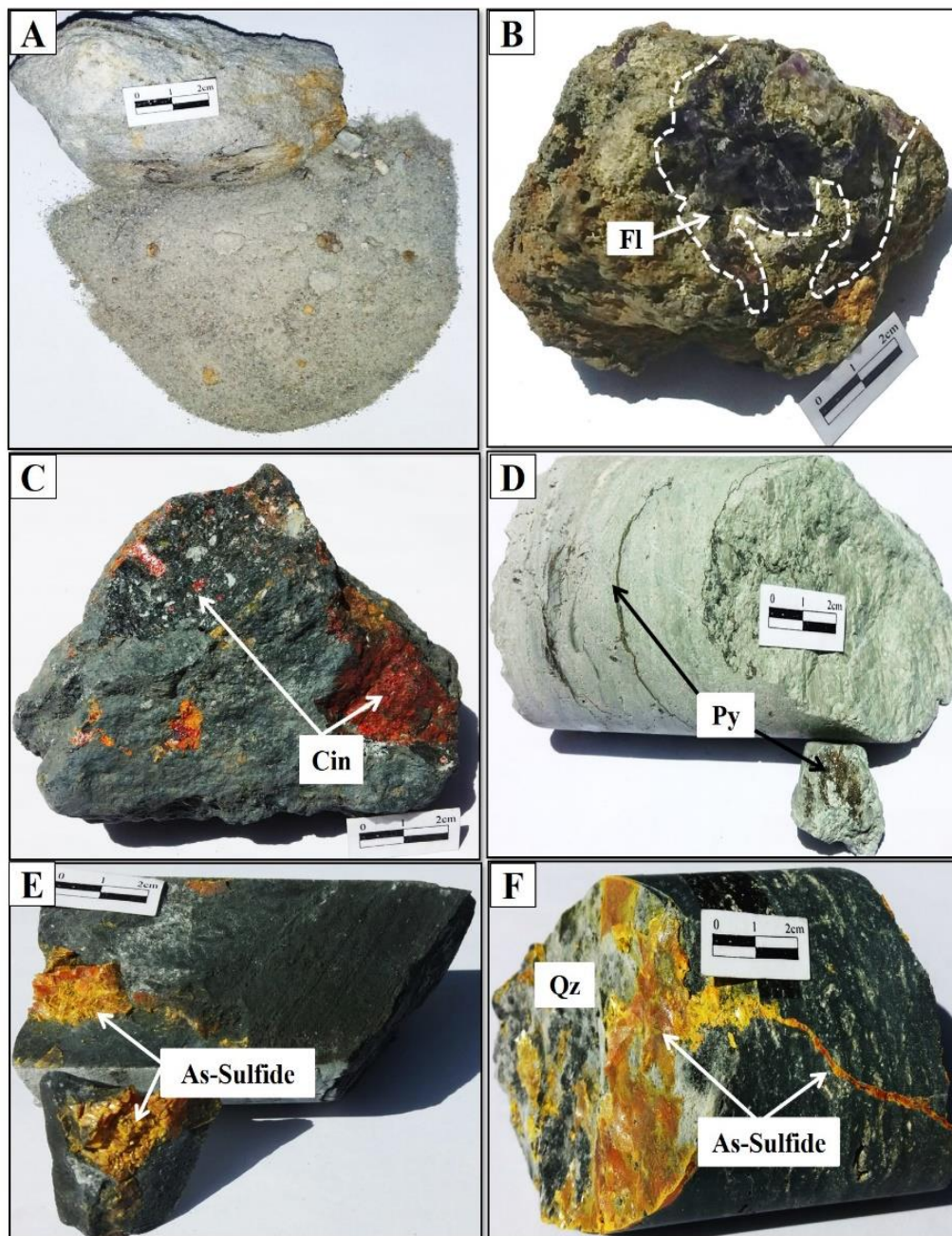
کوارتز، باریت، فلوریت، کلسیت، دولومیت، مسکویت/ایلیت و آلونیت هستند (شکل ۲-B تا E). کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای که رخداد طلا را به صورت ذرات آزاد (ابعاد ۵ تا ۳۰ میکرون) دارد (Karimi, 1993)، به ویژه همراه سولفیدهای آرسنیک (نظیر اورپمنت و رآلگار)، سینابر و اسفالریت گل کلمی شکل گرفته است (شکل ۲-F). علاوه بر این، بخشی از کانه‌زایی پیریت و پیریت آرسنیک‌دار نیز در سنگ میزبان کربناته واحد چالداغ تشکیل شده است که اغلب با حضور طلا در ترکیب شیمیایی شناخته می‌شود (شکل ۲-D). انواع مختلفی از دگرسانی‌های گرمابی شامل، دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک (کائولینیتی)، سریستی و کربنات‌زدایی در کانسار زرشوران مشاهده شده است.

**دگرسانی سیلیسی:** گسترده‌ترین دگرسانی گرمابی مرتبط با کانه‌زایی است که به تشکیل توده‌های ژاسپروئیدی در کانسار زرشوران منجر شده است. این دگرسانی ناشی از انحلال سنگ آهک چالداغ توسط محلول‌های اسیدی است که با حضور سیلیس جانیشینی یا ژاسپروئیدی به صورت پرکننده فضای خالی همراه کانه‌زایی سولفیدی شناخته می‌شود (شکل ۳-A). دگرسانی سیلیسی به خصوص در زون کانی‌سازی واحدهای شیلی و آهکی زرشوران حائز اهمیت است (Mehrabi et al., 1999). این دگرسانی طی واکنش (۱) رخ داده است:

واکنش (۱):



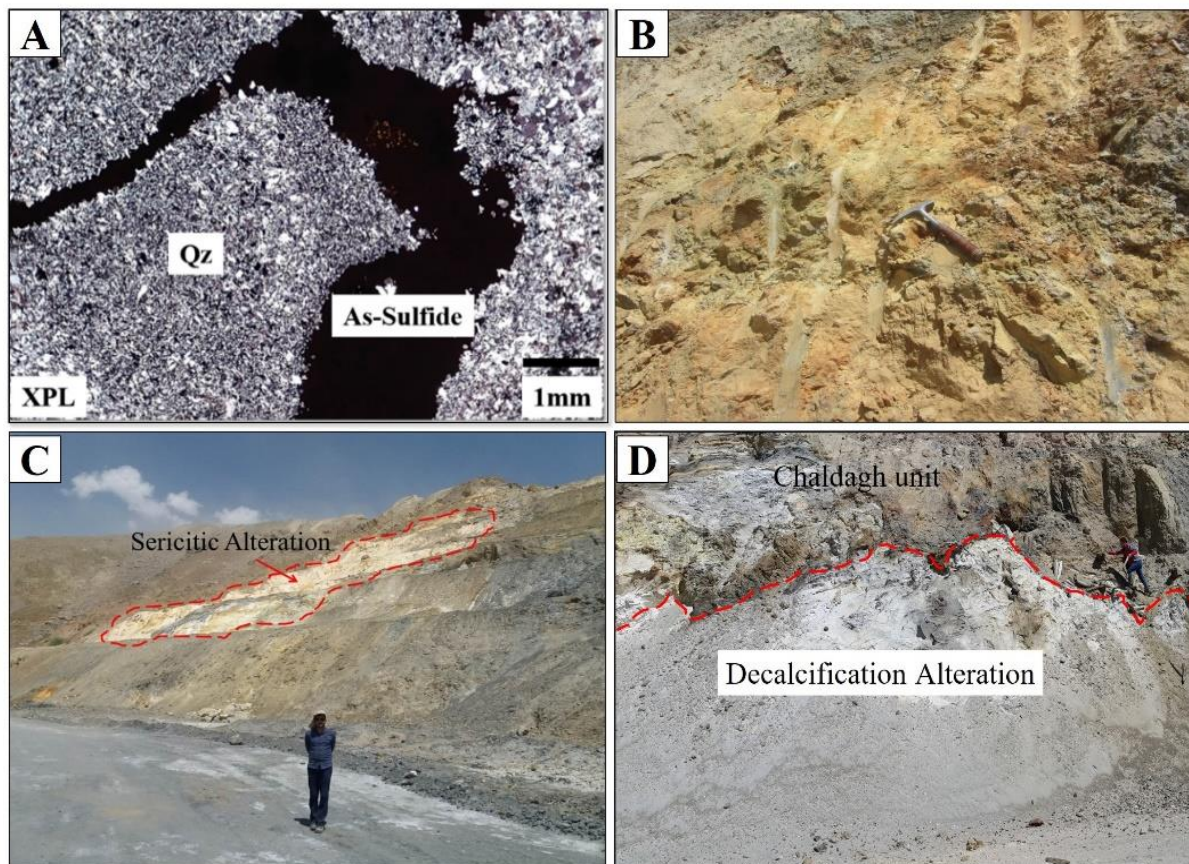
**دگرسانی آرژیلیک:** این دگرسانی در شرایط اسیدی به نسبت بالا و حضور حجم زیادی از آب در محیط تشکیل می‌شود (Pirajno, 2009). دگرسانی آرژیلیک در منطقه زرشوران اغلب در قسمت‌های سطحی سنگ‌های دربرگیرنده و بخش بیرونی کانسار مشاهده شده و باعث ایجاد رنگ سفید در سنگ‌های دیواره شده است (شکل ۳-B). کانی‌های رسی از جمله کائولینیت در شرایط کم دما (کمتر از ۳۵۰ درجه) و اسیدیته زیاد، در نتیجه هیدرولیز شدید سیلیکات آلومینیم‌دار تشکیل می‌شوند (Pirajno, 2009). چنان‌که در واکنش (۲) مشاهده می‌شود، تشکیل کائولینیت موجب کاهش  $\text{H}^+$  و افزایش pH و در



**شکل ۲.** تصویرهای نمونه دستی از واحدهای سنگی میزبان و رخداد کانه‌زایی در کانسار زرشوران. A: آهک‌های پودری کانسار زرشوران، B: باطله فلوریت بنفش، C: بلورهای قرمز سینابر با میزبان سیلستون سیاه، D: رگه-رگچه‌های پیریت در میزبان آهک چالداغ، E: سولفیدهای آرسنیک در شیل سیاه زرشوران، F: رگه-رگچه‌های سولفید آرسنیک با میزبان سیلستون. علامت اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوایز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (As-Sulfide: سولفید آرسنیک، Cin: سینابر، Fl: فلوریت، Py: پیریت، Qz: کوارتز).

**Fig. 2.** Photographs of hand samples of host rock and mineralization in the Zarshuran deposit. A: Powdered limestone from the Zarshuran deposit, B: Purple fluorite gangue, C: Cinnabar red crystals within black siltstone, D: Pyrite veins within Chaldagh limestone, E: As-sulfide within the Zarshuran black shale, and F: As-sulfide veins within siltstone. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (As-Sulfide: Arsenic sulfide, Cin: Cinnabar, Fl: Fluorite, Py: Pyrite, Qz: Quartz).





**شکل ۳.** تصویرهای معرف از دگرسانی‌های گرمایی مختلف کانسار زرشوران. A: تصویر میکروسکوپی نور عبوری متقاطع (XPL) از رخداد دگرسانی سیلیسی همراه با رگه‌های سولفید آرسنیک، B: رخمون صحرایی از دگرسانی آرژلیک، C: رخمون صحرایی از دگرسانی سریستی (دید به سمت شمال) و D: رخمون صحرایی از دگرسانی کربنات‌زدایی (دید به سمت جنوب غرب). علامت اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (As-Sulfide: سولفید آرسنیک، Qz: کوارتز).

**Fig. 3.** Representative figures from various hydrothermal alterations at the Zarshuran deposit. A: Photomicrographs (transmitted cross polarized light, XPL) of silicification with As-sulfide veins, B: Outcrops of argillic alteration (looking to northeast), C: Outcrops of sericitic alteration (looking to north), and D: Outcrops of decalcification alteration (looking to southwest). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (As-Sulfide: Arsenic sulfide, Qz: Quartz).

سنگ‌نگاری و بافتی مشخص قابل تشخیص است (Heshmatnia, 2021).

(۱) پیریت‌های فراموئیدال (PyO) (ابعاد ۱۰ تا ۶۰ میکرون): نخستین نوع از پیریت‌های موجود در منطقه به صورت تجمع‌های تمشکی شکل با ابعاد ۱۰ تا ۶۰ میکرون در میزبان دولومیت آهن‌دار واحد کربناتی چالداغ (شکل ۴-۴-۴)؛

(۲) پیریت‌های افشان: دومین نوع از پیریت‌ها به صورت دانه پراکنده یا

### کانی‌شناسی و شیمی پیریت

کانه‌های فلزی اصلی مشاهده شده در کانسار زرشوران شامل پیریت، سولفیدهای آرسنیک، آرسنوپیریت، اسفالریت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیرویت و ماکیناویت هستند. ویژگی‌های این کانی‌ها در ادامه شرح داده شده است:

**پیریت:** طبق بررسی‌های سنگ‌نگاری، پیریت مهم‌ترین کانه سولفیدی در کانسار زرشوران است که در شش نوع مختلف با ویژگی‌های

۴) پیریت‌های کلوفرمی Py4: این نسل از پیریت در میزان کلسیت و دولومیت و با ابعاد ۳۰۰ تا ۸۰۰ میکرون (متوسط ۵۵۰ میکرون) در آهک چالداغ تشکیل شده است (شکل ۴-D)؛

۵) پیریت‌های رگه‌ای Py5: به صورت رگه‌ای بوده و ابعاد بلورهای پیریت از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون (متوسط ۵۵ میکرون) متغیر است (شکل

۴-E). مشخصات این پیریت‌ها به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

افشان مرتبط با مرحله گرمایی اولیه در میزان کوارتز و کربنات‌های آهن‌دار (کلسیت و دولومیت) در میزان کربناتی چالداغ، مشاهده شده است. این دسته از پیریت‌ها با دو شکل متفاوت شامل: الف) دانه ریز بی‌شکل Py1 (ابعاد کوچک‌تر از ۲۰ میکرون) و ب) دانه درشت خودشکل Py2 (ابعاد ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون) (شکل ۴-B) وجود دارد؛  
۳) پیریت‌های اسفنجی Py3: نوع دیگری از پیریت‌ها به صورت بی‌شکل و سطح پرحفره و ابعاد ۲۰۰ تا ۵۰۰ میکرون (متوسط ۳۰۰ میکرون) (شکل ۴-C)؛

جدول ۱. سنگ‌نگاری و ویژگی‌های بافتی انواع مختلف پیریت در کانسار طلائی زرشوران (Heshmatnia, 2021; Tale Fazel, 2022)

Table 1. Petrographic and textural characteristics of different pyrite types at the Zarshuran deposit (Heshmatnia, 2021; Tale Fazel, 2022)

Environment	Mineralization stage	Symbols	Texture	Size range (µm)	Figure
Sedimentary		Py0	Framboidal	10–60	Fig. 4A
	Early	Py1	Fine-grained disseminated	<20	Fig. 4B
		Py2	Coarse-grained disseminated	50–150	Fig. 4B
Hydrothermal	Middle	Py3	Porous	200–500	Fig. 4C
		Py4	Colloform	300–800	Fig. 4D
	Late	Py5	Vein-type	10–100	Fig. 4E

(متوسط ۰/۳۰ درصد وزنی) است. پیریت افشان دانه درشت (Py2)، در تعداد ۲۴ نقطه دارای آهن به میزان ۴۳/۳۴ تا ۴۷/۱۵ (متوسط ۴۵/۹۶ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۱/۰۸ تا ۵۴/۴۵ (متوسط ۵۳/۲۷ درصد وزنی) و آرسنیک (متوسط ۰/۵۳ درصد وزنی) است. پیریت اسفنجی یا حفره‌دار (Py3)، در تعداد ۲۰ نقطه دارای آهن به میزان ۴۳/۷۶ تا ۴۶/۷۱ (متوسط ۴۵/۷۸ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۱/۸۶ تا ۵۴/۲۱ (متوسط ۵۳/۲۷ درصد وزنی) و آرسنیک (متوسط ۰/۱ درصد وزنی) است. پیریت گل کلمی (Py4)، در تعداد ۱۷ نقطه دارای آهن به میزان

بر اساس نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی از انواع مختلف پیریت در کانسار زرشوران (جدول ۲) نتایج زیر به دست آمده است:

پیریت فرامبوئیدال (Py0)، در تعداد ۸ نقطه دارای آهن به میزان ۴۵/۰۱ تا ۴۶/۱۰ (متوسط ۴۵/۴۷ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۲/۳۹ تا ۵۴/۰۴ (متوسط ۵۳/۱۱ درصد وزنی) و آرسنیک (متوسط ۰/۱۶ درصد وزنی) است. پیریت افشان دانه ریز (Py1)، در تعداد ۲۲ نقطه دارای آهن به میزان ۴۳/۷۵ تا ۴۶/۷۶ (متوسط ۴۵/۶۴ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۰/۴۶ تا ۵۳/۷۴ (متوسط ۵۳/۲۱ درصد وزنی) و آرسنیک

۴۵/۷۹ تا ۴۷/۶۸ (متوسط ۴۷/۰۸ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۱/۳۷ تا ۴۵/۸۲ (متوسط ۴۶/۶۱ درصد وزنی)، گوگرد به میزان ۵۳/۳۶ تا ۵۲/۰۶ (متوسط ۵۲/۰۶ درصد وزنی) و آرسنیک (متوسط ۰/۰۶ درصد وزنی) است. پیریت رگه‌ای (Py5)، در تعداد ۱۳ نقطه دارای

جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کالواکترونی (EPMA) عناصر اصلی و کمیاب در انواع مختلف پیریت کانسار زرشوران (Heshmatnia, 2021; Tale Fazel, 2022)

Table 2. EPMA results of major and trace elements in pyrite types of the Zarshuran deposit (Heshmatnia, 2021; Tale Fazel, 2022).

Elements	Unit	Py0 (n=8)	Py1 (n=22)	Py2 (n=24)	Py3 (n=20)	Py4 (n=17)	Py5 (n=13)
<b>Fe</b> (average)	wt. %	45.01–46.10 (45.47)	43.75–46.76 (45.64)	43.34–47.15 (45.96)	43.76–46.71 (45.78)	45.79–47.68 (47.08)	45.82–47.51 (46.61)
<b>S</b> (average)	wt. %	52.39–54.04 (53.11)	50.46–53.74 (53.21)	51.08–54.45 (53.27)	51.86–54.21 (53.27)	51.37–53.36 (52.06)	50.94–53.67 (52.73)
<b>As</b> (average)	wt. %	bdl–0.49 (0.16)	bdl–3.99 (0.30)	0.01–3.65 (0.53)	0.01–0.86 (0.10)	bdl–0.21 (0.06)	bdl–3.13 (0.48)
<b>Au</b> (average)	ppm	bdl–0.03 (0.01)	bdl–0.04 (0.02)	bdl–0.05 (0.03)	bdl–0.03 (0.02)	bdl–0.06 (0.04)	bdl–0.03 (0.01)

bdl= below detection limit, n= point of analysis.

آرسنیک در زمینه کانی‌های باطله کوارتز و دولومیت رخ داده است (شکل ۴-I).

**مگنتیت:** از کله‌های اکسیدی با ابعاد ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون به صورت بلورهای خودشکل تا بی‌شکل در مقاطع میکروسکوپی به صورت هم‌رشد با پیریت‌های افشان دانه درشت (Py2) در زمینه کربناتی مشاهده شد (شکل ۴-J).

**کالکوپیریت:** به عنوان کانه سولفیدی فرعی در بررسی‌های میکروسکوپی به مقدار خیلی کم و به صورت ادخال‌های ریز و بی‌شکل (۲۰ تا ۵۰ میکرون) در میزبان پیریت‌های اسفنجی (Py3) رخ داده است (شکل ۴-K).

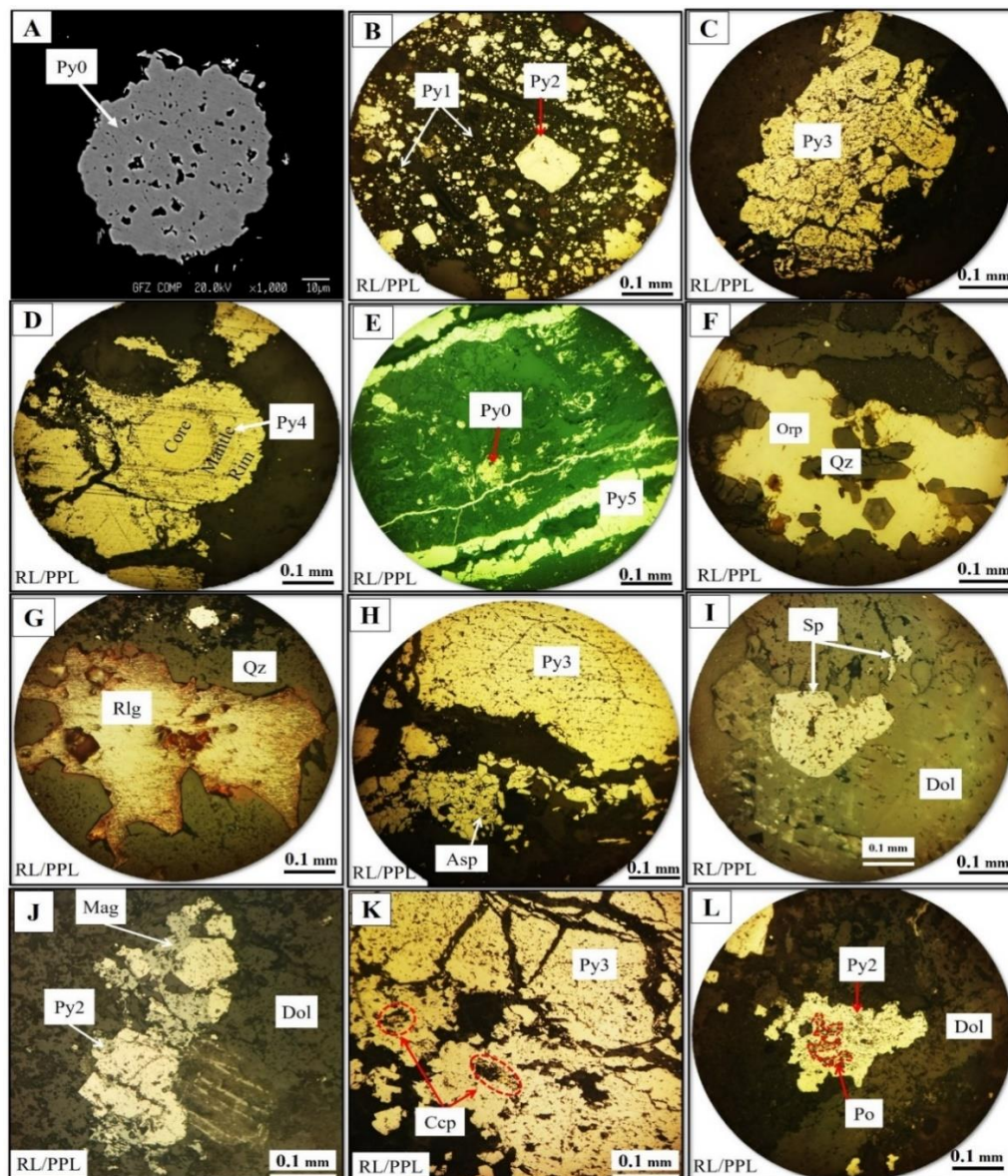
**پیروتیت:** فراوانی پیروتیت در مقاطع، بسیار ناچیز است و ابعاد آن کمتر از ۴۰ میکرون و به صورت ادخال‌های بی‌شکل درون پیریت‌های افشان دانه درشت (Py2) وجود دارد (شکل ۴-L).

**اورپیمنت و رآلگار:** بعد از پیریت، فراوان‌ترین کانه سولفیدی در زرشوران، اورپیمنت است و اغلب رآلگار به صورت بلورهای بی‌شکل همراه با اورپیمنت تشکیل می‌شود. این کانه‌ها در نمونه دستی به رنگ نارنجی تا زرد در سنگ میزبان شیل سیاه و کربناته مشاهده شده‌اند. در بررسی‌های میکروسکوپی این کانه‌ها دارای یافت رگه‌ای، پرکننده فضای خالی و دانه‌پراکنده همراه با کانی‌های باطله کوارتز، کلسیت و دولومیت هستند (شکل ۴-F و G).

**آرسنوپیریت:** این کانه اغلب با رنگ بازتابی سفید روشن به صورت مجموعه‌ای از بلورهای نیزه‌ای شکل یا سوزنی (ابعاد کمتر از ۲۵ میکرون) همراه با پیریت‌های اسفنجی (Py3) مشاهده می‌شود (شکل ۴-H).

**اسفالریت:** با ابعاد ۹۰ تا ۶۰۰ میکرون به صورت بی‌شکل مشاهده می‌شود که همراه با سولفیدهای دیگر نظیر پیریت و سولفیدهای





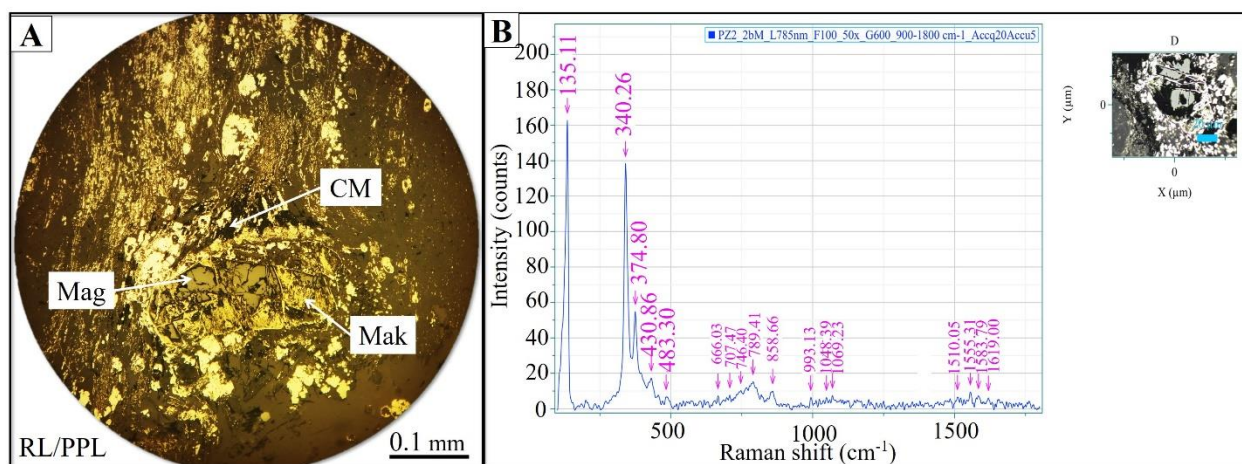
**شکل ۴.** تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی عادی، PPL) و الکترونی روبشی از کانه‌های مختلف در کانسار زرشوران. A: تصویر BSE از پیریت فرامبوئیدال (Py0)، B: پیریت‌های افشان دانه‌ریز (Py1) همراه با پیریت‌های افشان دانه‌درشت (Py2)، C: پیریت اسفنجی (Py3)، D: پیریت گل‌کلمی (Py4)، E: پیریت رگه‌ای (Py5) همراه با پیریت فرامبوئیدال (Py0)، F: اورپیمنت، G: رآلگار با کوارتز، H: آرسنوپیریت همراه با پیریت اسفنجی، I: اسفالریت با دولومیت، J: هم‌رشدی مگنتیت با پیریت‌های افشان دانه‌درشت، K: ادخال‌های کالکوپیریت در پیریت اسفنجی و L: ادخال‌های پیروتیت در پیریت افشان دانه‌درشت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Asp: آرسنوپیریت، Ccp: چالکوپیریت، Dol: دولومیت، Mag: مگنتیت، Orp: اورپیمنت، Po: پیروتیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Rlg: رآلگار، Sp: اسفالریت).

**Fig. 4.** Photomicrographs (reflected polarized light, PPL) and BSE images of various minerals in the Zarshuran deposit. A: BSE images of framboidal pyrite (Py0), B: fine-grained disseminated pyrites (Py1) with coarse-grained disseminated pyrites (Py2), C: sponge or porous pyrite (Py3), D: colloform pyrite (Py4), E: vein-type pyrite (Py5) with framboidal pyrite (Py0), F: orpiment, G: realgar with quartz, H: arsenopyrite with porous pyrite, I: sphalerite with dolomite, J: intergrowth of magnetite with coarse-grained pyrite, K: chalcopyrite inclusions in porous pyrite, and L: pyrrhotite inclusions in coarse-grained disseminated pyrite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Asp: Arsenopyrite, Ccp: Chalcopyrite, Dol: Dolomite, Mag: Magnetite, Orp: Orpiment, Po: Pyrrhotite, Py: Pyrite, Qz: Quartz, Rlg: Realgar, Sp: Sphalerite).



برای شناخت دقیق ماکیناویت از طیف رامان استفاده شد که قله‌های اصلی ماکیناویت در طیف‌های  $135/11\text{ cm}^{-1}$  و  $340/26\text{ cm}^{-1}$  مورد شناسایی قرار گرفت (شکل ۵-B).

ماکیناویت ( $\text{Fe}_9\text{S}_8$ ): با شکل و ظاهر خورده شده، رنگ بازتابی زرد کم رنگ، ناهمسان‌گردی ضعیف در ابعاد متوسط ۲۰۰ میکرون، همراه با مواد آلی کربن‌دار، مگنتیت و پیریت تشخیص داده شد (شکل ۵-A).



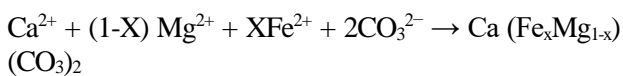
شکل ۵. A: تصویر میکروسکوپی (نور بازتابی عادی، PPL) از ماکیناویت همراه با مواد آلی و مگنتیت در کانسار زرشوران و B: الگوی طیف‌سنجی لیزر رامان از ماکیناویت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویته و اوآز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (CM: ماده آلی کربن‌دار، Mak: ماکیناویت، Mag: مگنتیت).

**Fig. 5.** A: Photomicrographs (reflected polarized light, PPL) of mackinawite with carbonaceous material and magnetite in the Zarshuran deposit, and B: Raman laser spectroscopy pattern from mackinawite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (CM: Carbonaceous material, Mak: Mackinawite, Mag: Magnetite).

رسوبی با دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق انتقال فازهای نیمه پایدار مونوسولفید اولیه ( $\text{FeS}^0$ ) نظیر ماکیناویت ( $\text{Fe}_9\text{S}_8$ ) (شکل ۵) شکل گرفته‌اند.

۲) **مرحله دیاژنتیک:** طی این مرحله با عمیق شدن حوضه رسوبی و فعل و انفعالات شیمیایی گسترده، آهن فرو ( $\text{Fe}^{2+}$ ) با واحدهای کربناتی چالداغ واکنش داده و کربنات‌های آهن‌دار (نظیر دولومیت آهن‌دار، شکل ۶-C) طبق واکنش (۴) شکل گرفته‌اند. مواد آلی نیز در این مرحله وجود دارد (شکل ۷).

واکنش (۴):



۳) **مرحله گرمایی:** بر اساس روابط بافتی و معیارهای کانه‌زایی، مرحله

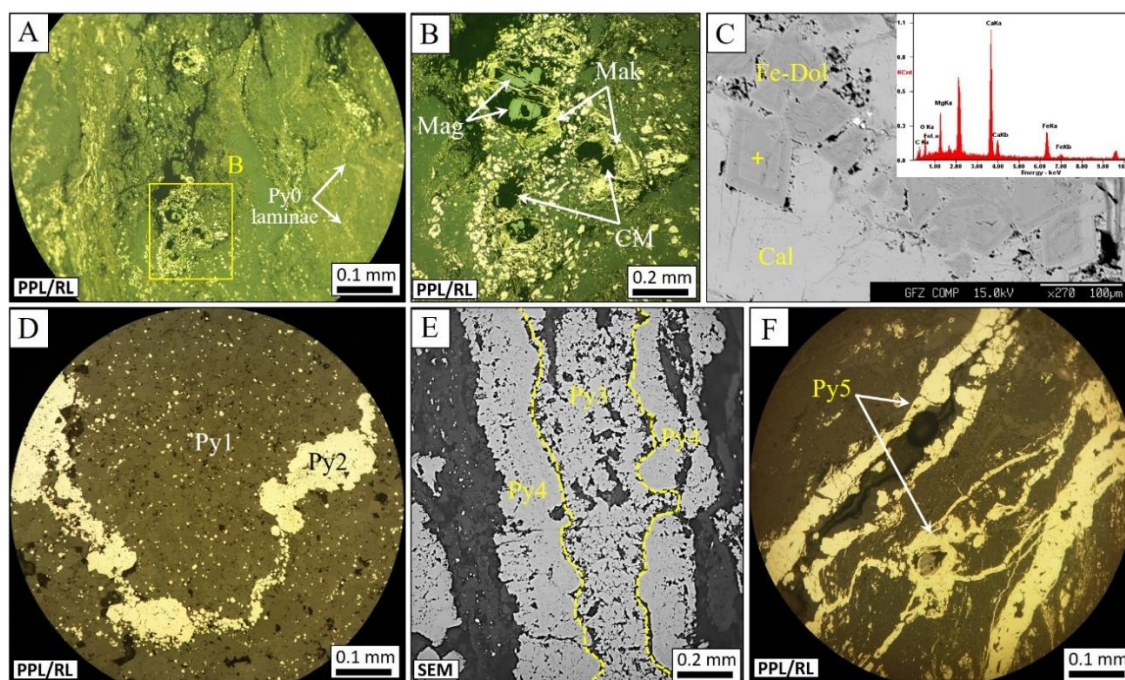
## توالی همبرزادی

طبق شواهد صحرایی و آزمایشگاهی، مراحل تکوین کانه‌زایی و تشکیل کانسار زرشوران را می‌توان به چهار مرحله به شرح زیر معرفی کرد. تصویرهای کانه‌زایی مراحل مختلف به همراه توالی همبرزادی به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ نمایش داده شده است:

۱) **مرحله هم‌زمان با رسوب‌گذاری:** طی این مرحله پیریت‌های فرامبوئیدال ( $\text{PyO}$ ) هم‌راستا با ساختار لامینه‌ای سنگ میزبان اغلب به همراه ماکیناویت، مگنتیت و مواد آلی تشکیل شده‌اند (شکل ۶-A و B). بر اساس نتایج تجزیه ریز کواالکترونی، طلا با محتوای ناچیز (متوسط ۰/۰۱ درصد وزنی) به صورت محلول جامد ( $\text{Au}^+$ ) در شبکه پیریت‌های فرامبوئیدال تشکیل شده است. در این مرحله، پیریت‌های رسوبی تشکیل شده در اثر فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی به طور مستقیم در حوضه

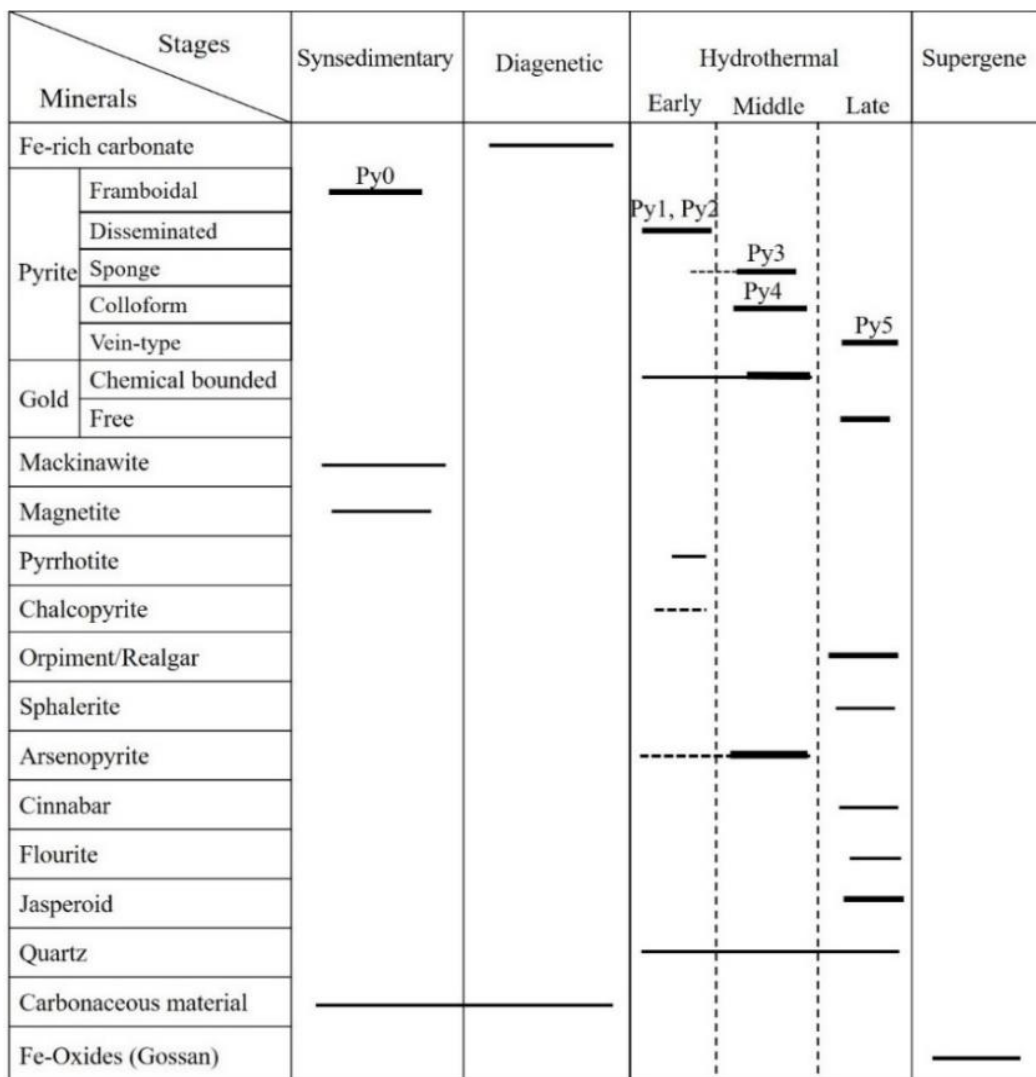
( $Au^+$ ) در شبکه پیریت‌ها شده است (شکل ۷). در این مرحله پیریت‌های اسفنجی توسط پیریت‌های گل کلمی در بر گرفته شده‌اند (شکل ۶-ع). (ج) **گرمایی تأخیری**: این مرحله شامل کانه‌زایی پیریت‌های رگه‌ای ( $Py5$ ) (شکل ۶-ف) همراه رگه‌های اورپیمنت-رآلگار، اسفالریت، سینابر، فلوریت و ژاسپروئید است. در این مرحله، نانوذرات طلائی آزاد ( $Au^0$ ) همراه با سولفیدهای آرسنیک و اسفالریت تشکیل شده است. همچنین ژاسپروئید، کوارتز و دولومیت به صورت رگه-رگچه‌ای و پراکنده فضای خالی در این مرحله ته‌نشین شده‌اند (شکل ۷). (د) **مرحله سوپرژن**: این مرحله شامل اکسید و هیدروکسیدهای آهن نظیر هماتیت و گوتیت بوده که پهنه گوسان نام دارد (شکل ۷).

گرمایی به سه مرحله زیر تقسیم می‌شود:  
**الف) گرمایی اولیه**: کانی‌های غالب در این مرحله شامل پیریت‌های افشان ( $Py1$  و  $Py2$ )، آرسنوپیریت، کالکوپیریت، پروتیت و کوارتز هستند (شکل ۷). طبق شواهد سنگ‌نگاری، پیریت‌های افشان دانه درشت از تجمع پیریت‌های افشان دانه ریز شکل گرفته‌اند (شکل ۶-د).  
**ب) گرمایی میانی**: این مرحله، اصلی‌ترین مرحله کانه‌زایی است و شامل کانه‌زایی پیریت‌های گل کلمی ( $Py4$ )، آرسنوپیریت، پیریت‌های اسفنجی ( $Py3$ ) و کوارتز است. در مرحله گرمایی به دلیل حضور گونه‌های مختلف آرسنیک ( $As^+$ ،  $As^{2+}$  و  $As^{3+}$ ) در سیال به عنوان عنصر جاذب طلا موجب تشکیل بخش عمده‌ای از  $Au$  به صورت‌های محلول جامد



**شکل ۶**. تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی عادی، PPL) و الکترونی روبشی از مراحل مختلف کانه‌زایی در کانسار زرشوران. A و B: لامینه‌های فرامبوئیدال پیریت ( $Py0$ ) همراه گرهک‌های ماکیناویت، مگنتیت و ماده آلی، C: تصویر BSE از دولومیت‌های آهن‌دار همراه الگوی EDS، D: پیریت‌های افشان ریزبلور ( $Py1$ ) که از تجمع آنها پیریت‌های افشان درشت‌بلور ( $Py2$ ) شکل گرفته‌اند، E: تصویر BSE از پیریت‌های اسفنجی ( $Py3$ ) که توسط پیریت‌های گل کلمی ( $Py4$ ) در بر گرفته شده است و F: پیریت‌های رگه‌ای مرحله آخر ( $Py5$ ). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، CM: ماده آلی کربن‌دار، Dol: دولومیت، Mak: ماکیناویت، Mag: مگنتیت).

**Fig. 6.** Photomicrographs (reflected polarized light, PPL) and BSE images of various mineral stages in the Zarshuran deposit. A and B: lamination of framboidal pyrite ( $Py0$ ) associated with nodular mackinawite, magnetite, and carbonaceous material, C: BSE images of Fe-dolomite with EDS pattern, D: fine-grained disseminated pyrite ( $Py1$ ) which from their aggregations the coarse-grained disseminated pyrite ( $Py2$ ) were formed, E: BSE images from sponge pyrite ( $Py3$ ) which enclosed by colloform pyrite ( $Py4$ ), F: vein-type late stage pyrite ( $Py5$ ). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: Calcite, CM: Carbonaceous material, Dol: Dolomite, Mak: Mackinawite, Mag: Magnetite).



شکل ۷. توالی هم‌بزرادی کانسار طلائی زرشوران. ضخامت خطوط، نشان‌دهنده فراوانی کانی‌ها در هر مرحله است.

**Fig. 7.** Paragenetic sequence of minerals in the Zarshuran gold deposit. The thickness of the lines indicates the abundance of minerals in each stage.

## بحث

### عوامل مؤثر در ته‌نشست طلا

کلنه‌های سولفید آرسنیک و پیریت آرسنیک‌دار گزارش شده‌اند (Bagby and Berger, 1985). فرض می‌شود که کانه‌زایی دانه‌پراکنده اولیه طلا در پاسخ به سولفیدی‌شدن آهن احیایی ( $Fe^{2+}$ ) در پیریت رخ می‌دهد. بررسی‌های تجربی، سولفور را به عنوان یک لیگاند کمپلکس طلا مشخص می‌کند (Shenberger and Barnes, 1989) و تجزیه ترکیب گازهای سیالات در گیر حضور لیگاند  $H_2S$  را در محلول‌های طلا‌دار تأیید کرده‌اند (Hofstra et al., 1991). ته‌نشست طلا از چنین

پیریت مهم‌ترین کانی‌میزبان طلا در کانسارهای طلا با میزان رسوبی است (Deditius et al., 2014) و طی تعامل سیالات گرمایی حاوی  $H_2S$  با واحدهای آهن‌دار نظیر کربنات‌های آهن‌دار در سنگ‌میزبان شکل می‌گیرد. ذخایر طلائی افشان با سنگ‌میزبان رسوبی، از نظر اقتصادی دارای اهمیت بالایی هستند و به عنوان ذخایر طلائی نامرئی در ساختمان

### مقایسه عملکرد فرایندهای سولفیداسیون و پیریتی شدن در کانسار زرشوران

اطلاعات مربوط به رابطه بین پیریت و طلا در کانسار زرشوران را می‌توان از محتوای آهن و سولفور نمونه‌های سنگ کل به دست آورد (جدول ۳). در این مقایسه، محتوای Fe و S نسبت به محتوای Al نرمال شده‌اند (Hofstra and Cline, 2000). در شکل ۹، نمودار Fe/Al در مقابل S/Al برای نمونه‌های عیار بالای طلا (بیش از ۱ گرم در تن) و برای نمونه‌های عیار پایین طلا (کمتر از ۱ گرم در تن) نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، افزایش عیار طلا (مثلث‌های قرمز) در این کانسار بیش از آنکه با افزایش میزان پیریت یا دگرسانی پیریتی شدن (دایره‌های زرد) همراه باشد، با افزایش محتوای سولفور یا فرایند سولفیداسیون منطبق است. (شکل ۹). این بدین معنی است که احتمال حضور طلا در این کانسار همراه سایر سولفیدها (نظیر سولفیدهای آرسنیک-جیوه-آنتیموان در رگه‌های تأخیری) می‌تواند اهمیت بیشتری نسبت به وجود پیریت‌های مختلف داشته باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد در کانسار زرشوران فرایند سولفیداسیون در افزایش عیار ذخیره و رخداد کانه‌زایی نقش مؤثری داشته است. از این نظر، یکی از اختلاف‌های اصلی کانسار زرشوران با دیگر ذخایر طلائی نوع کارلین همین موضوع است که موجب می‌شود کانسار زرشوران ویژگی‌های اصلی ذخایر کارلین را نشان ندهد.

### محاسبه درجه سولفیداسیون

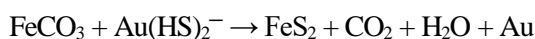
کنترل و همکاران (Kettler et al., 1990) درجه سولفیداسیون را توسط معادله DOS به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$DOS = (S \text{ wt.}\%) / 1.15 * (Fe \text{ wt.}\%)$$

در معادله DOS، ضریب ۱/۱۵ با نسبت جرم Fe/S در پیریت برابر است؛ بنابراین محتوای گوگرد به اندازه‌ای باشد که بتواند همه آهن موجود در سنگ را به پیریت تبدیل کند. مقادیر آهن و سولفور سنگ کل به طور معرف از گمانه UU-38 در کانسار زرشوران در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۱۰-A ارتباط میان محتوای طلا با درجه سولفیداسیون کانسار زرشوران را نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود

محلول‌هایی می‌تواند تحت تأثیر فرایندهایی نظیر اکسایش سیال (Shenberger and Barnes, 1989)، جوشش (به احتمال با ته‌نشست هم‌زمان سولفیدهای فلزهای پایه) یا سولفیداسیون آهن احیا (Hofstra et al., 1991)، قرار گیرد که فعالیت گونه‌های سولفوری را کاهش می‌دهند. اهمیت سولفیداسیون در ته‌نشینی Au به واکنش پذیری یون  $Fe^{2+}$  سنگ میزبان و  $H_2S$  سیال گرمایی وابسته است. برخی پژوهشگران شکل‌گیری دولومیت آهن‌دار را به فرایندهای اپی‌ژنتیک یا تدفین با دماهای نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت داده‌اند (Wong and Oldershaw, 1981). همچنین، دولومیت‌های آهن‌دار در سطوح نزدیک به سطح تشکیل شده و تا اعماق به شکل‌گیری خود ادامه می‌دهند (Dickson and Coleman, 1980). سولفیداسیون زمانی رخ می‌دهد که سیال گرمایی غنی از سولفید با سنگ میزبان آهن‌دار واکنش داده و کانه‌های پیریت، مارکاسیت یا پروتیت را تشکیل دهد (Kettler et al., 1990). نهشت سولفیدهای آهن باعث کاهش فعالیت سولفیدهای محلول و ناپایداری کمپلکس‌های پی‌سولفیدی در سیال گرمایی شده و در نهایت سبب ته‌نشست طلا طبق واکنش ۵ می‌شود.

واکنش (۵):

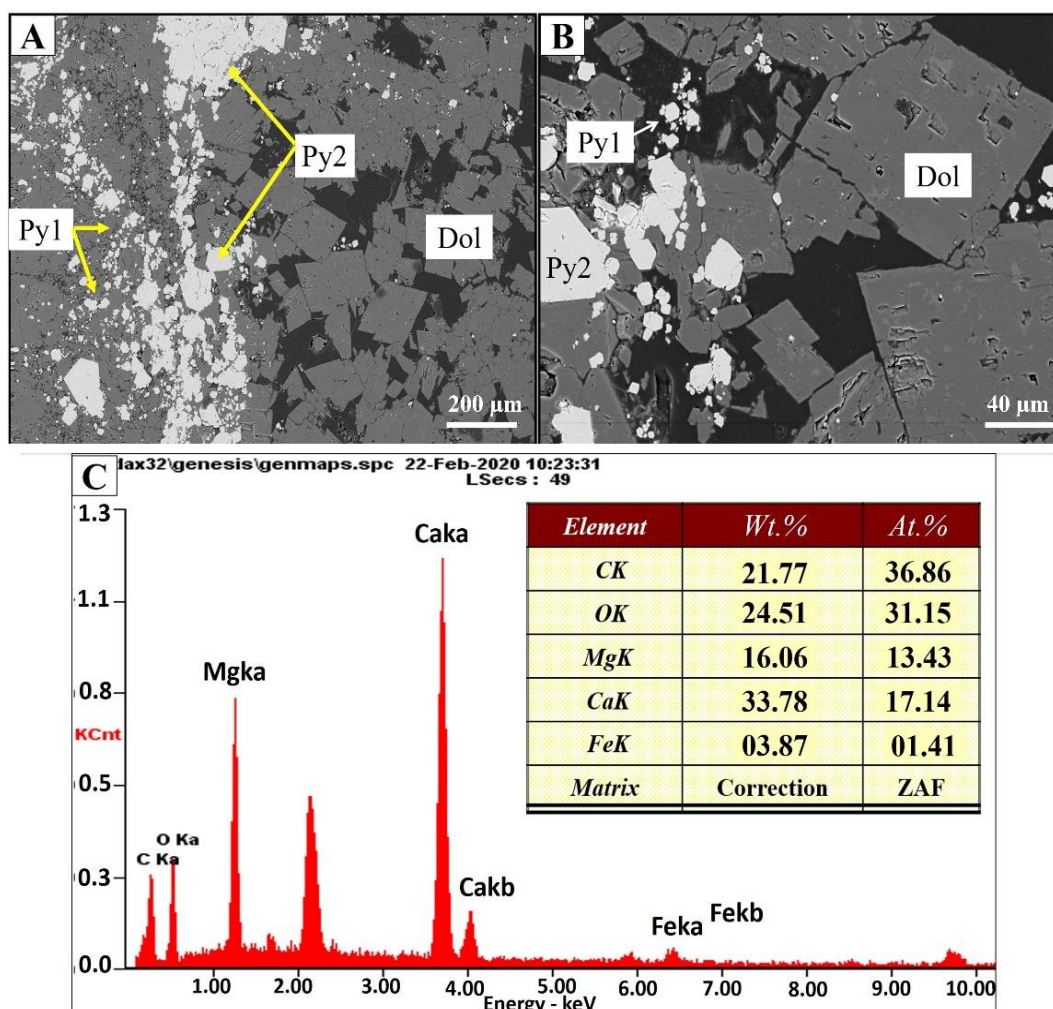


بررسی‌های کانی‌شناسی و فراوانی عناصر آهن و گوگرد در کلیه سنگ‌های کانسار زرشوران نشان می‌دهد که کانه‌زایی فلزهای گران‌بها با سولفیداسیون همراه بوده است. کربنات‌های آهن‌دار محصولات رایج دیاژنز در رسوبات غنی از مواد آلی هستند؛ اما وقوع آنها به اختلاط جانبی محیط‌های دیاژنتیکی کربناتی غنی از کربن و متان نیاز دارد (Maynard, 1982). با توجه به این موضوع، احتمال بالایی وجود دارد که پیریت‌های افشان (Py1 و Py2) در کانسار زرشوران توسط سولفیداسیون کربنات‌های آهن‌دار شکل گرفته باشند (شکل ۸-A و B). به طور کلی، در کانسار زرشوران، سنگ‌های رسوبی حاوی کانه‌زایی، دارای آهن بیشتری نسبت به سنگ‌های رسوبی بدون کانه‌زایی هستند و الگوهای آشکار ساز EDS انجام شده بر روی نمونه‌های کانه‌زایی نشان می‌دهد که دولومیت‌های موجود در این منطقه دارای محتوایی از آهن (تا ۱/۵ درصد وزنی) هستند (شکل ۸-C).



زرشوران، مقادیر بالای طلاي آزاد ( $Au^0$ ) همراه با رگه‌های تأخیری اورپیمت-رالگار و اسفالریت گل کلمی گزارش شده است (Daliran et al., 2018). این شواهد نشان می‌دهد که در کانسار زرشوران، سولفیداسیون سنگ‌های میزبان نقش اصلی در کانه‌زایی طلا دارد. در این میان، پیریت‌های گل کلمی (Py4) مرتبط با مرحله گرمایی اصلی، بیشترین محتوای طلا (بیشینه ۰/۰۶ گرم در تن) را دارند (شکل ۱۰-B).

همبستگی معناداری بین محتوای طلا و درجه سولفیداسیون وجود دارد و با افزایش مقدار DOS ( $DOS > 1$ )، عیار طلا نیز افزایش می‌یابد. چنان‌که در شکل ۹ نیز مشاهده شد، سولفور به محیط اضافه شده و فرایند سولفیداسیون رخ داده است. به همین دلیل، پیریت‌های کانسار زرشوران اغلب از محتوای طلاي بالایی برخوردار نیستند و طلا همراه آرسنیک به صورت محلول جامد ( $Au^+$ ) در شبکه پیریت وارد شده است. در کانسار



شکل ۸. A و B: تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی از دولومیت‌های آهن‌دار همراه با پیریت‌های افشان دانه‌ریز (Py1) و دانه‌درشت (Py2) در کانسار طلاي زرشوران و C: الگوی آشکارساز EDS از دولومیت‌های کانسار زرشوران که محتوای آهن تا ۴ درصد وزنی را در ترکیب آنها نشان می‌دهد. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Dol: دولومیت، Py: پیریت).

**Fig. 8.** A and B: BSE images of Fe-dolomites with fine-grained pyrite (Py1) and coarse-grained pyrite (Py2) in Zarshuran gold deposit, and C: EDS pattern of dolomites shows Fe content about 4 wt.% in their composition. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Dol: Dolomite, Py: Pyrite).

جدول ۳. داده‌های سنگ کل معرف از گمانه UU-38 (موقعیت در شکل ۱) در کانسار زرشوران. غلظت‌ها بر حسب ppm است.

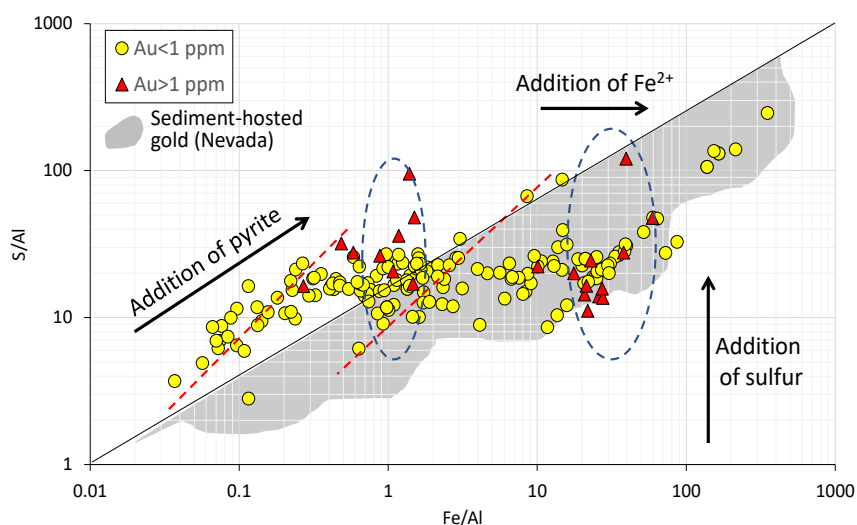
Table 3. Representative whole rock data from UU-38 drill hole (location in Fig. 1) in Zarshuran deposit. Based on ppm.

no	Elements				no.	Elements				no.	Elements			
	Fe	Al	S	Au		Fe	Al	S	Au		Fe	Al	S	Au
1	19701	1181	1290	0.078	38	30872	2057	17176	0.005	75	13302	986	5966	0.489
2	23382	1207	1693	0.217	39	14555	1334	208	0.008	76	11230	504	322	0.971
3	17796	1262	871	0.037	40	30385	2223	400	0.005	77	6845	247	144	1.534
4	16236	843	703	0.051	41	19779	3329	360	0.005	78	3687	179	193	1.097
5	24064	1541	664	0.046	42	22265	4528	256	0.009	79	3942	231	148	0.764
6	22045	851	821	0.051	43	16460	1853	246	0.027	80	6300	131	196	1.621
7	16857	1781	252	0.112	44	21720	1537	451	0.011	81	3063	171	227	0.775
8	23436	2667	203	0.108	45	17201	1746	414	0.011	82	4442	266	181	0.936
9	29793	8053	297	0.13	46	20434	1736	229	0.026	83	9837	308	149	1.385
10	22432	3229	239	0.142	47	53343	3306	7695	0.146	84	16125	169	234	2.016
11	16028	2158	181	0.104	48	8505	776	173	0.022	85	2209	116	249	0.177
12	16038	2589	187	0.144	49	8577	502	213	0.031	86	3205	141	362	0.168
13	14252	2197	211	0.148	50	17160	635	1005	0.005	87	9024	250	294	1.287
14	20642	2965	208	0.218	51	21401	1230	581	0.044	88	9271	352	309	1.455
15	21228	1980	401	0.077	52	9589	443	408	0.049	89	7538	341	340	0.955
16	24760	1606	364	0.052	53	11640	1148	1667	0.087	90	3520	165	273	0.399
17	31538	1348	8752	0.015	54	12479	516	581	0.062	91	8919	333	391	0.67
18	20971	1280	529	0.005	55	23126	586	8671	0.005	92	2374	102	167	0.123
19	26011	2911	11967	0.261	56	11771	488	6219	0.011	93	3967	170	264	0.141
20	63118	2782	55669	0.075	57	12408	496	9303	0.013	94	1307	102	193	0.063
21	18269	736	872	0.013	58	8394	360	417	0.013	95	2203	140	188	0.078
22	7053	356	126	0.005	59	9685	358	347	0.012	96	48649	357	54760	0.017
23	9719	546	121	0.005	60	12941	783	370	0.032	97	1947	182	154	0.155
24	14238	1236	119	0.011	61	9143	603	525	0.413	98	2970	253	247	0.321
25	14879	699	167	0.013	62	4387	217	1216	0.118	99	25300	291	4273	0.02
26	8641	468	146	0.022	63	10286	656	356	0.195	100	26317	392	3348	0.011
27	7582	832	769	0.026	64	7421	608	662	0.067	101	2425	188	139	0.203
28	10243	596	434	0.03	65	5562	253	461	0.023	102	4884	279	173	0.398
29	7639	417	186	0.005	66	23179	958	10183	0.067	103	2388	193	444	0.196
30	6023	233	136	0.005	67	15035	635	794	0.134	104	2939	246	668	0.276
31	8757	469	149	0.018	68	12301	718	6520	0.036	105	1621	263	167	0.148
32	25303	2929	194	0.226	69	10578	532	4595	0.031	106	2874	175	243	0.232
33	9358	659	214	0.041	70	13781	687	3182	0.082	107	12711	404	6379	0.451
34	15926	1030	783	0.024	71	8166	366	3688	0.07	108	6181	235	2243	0.126
35	9576	948	1530	0.058	72	14160	661	2622	0.079	109	7687	452	11718	2.171
36	20021	2003	176	0.054	73	4374	234	1761	0.074	110	5715	410	8494	1.97
37	18072	1103	127	0.013	74	4094	223	1490	0.103	111	6515	453	9674	1.472

ادامه جدول ۳. داده‌های سنگ کل معرف از گمانه UU-38 (موقعیت در شکل ۱) در کانسار زرشوران. غلظت‌ها بر حسب ppm است.

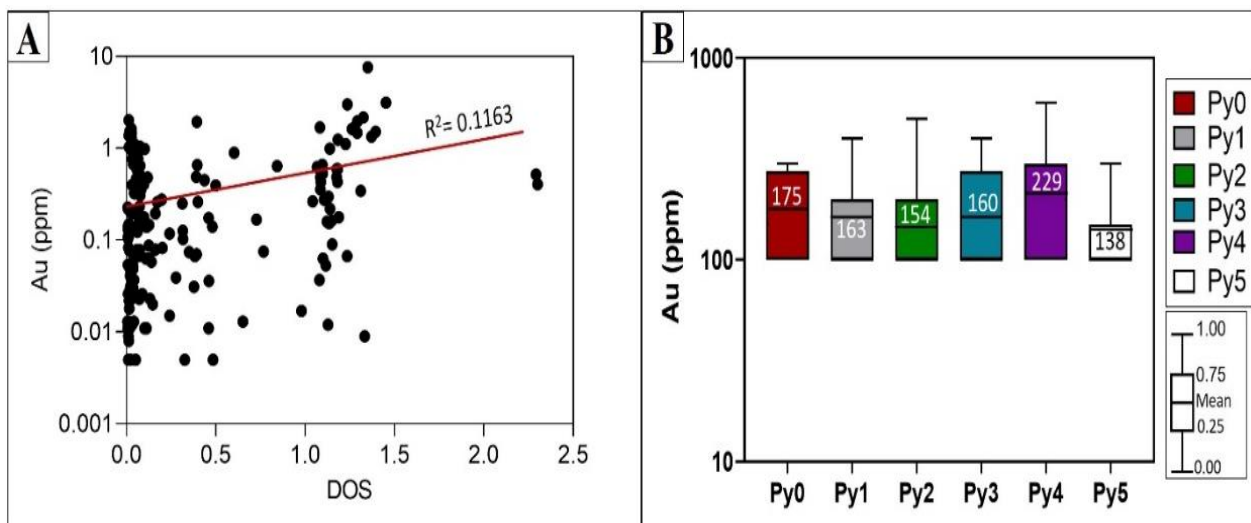
**Table 3 (Continued).** Representative whole rock data from UU-38 drill hole (location in Fig. 1) in Zarshuran deposit. Based on ppm.

no.	Elements				no.	Elements				no.	Elements			
	Fe	Al	S	Au		Fe	Al	S	Au		Fe	Al	S	Au
112	12841	861	1489	0.011	124	10551	350	4812	0.656	136	1397	162	1898	0.594
113	3855	210	500	0.139	125	8291	385	597	0.44	137	3884	141	10236	0.519
114	7899	542	394	0.325	126	4014	179	269	0.588	138	6031	184	15957	0.406
115	8310	402	731	0.309	127	1355	107	184	0.479	139	4548	227	6189	1.243
116	8782	575	374	0.745	128	31910	666	39791	0.484	140	6809	432	9881	1.618
117	13720	615	6203	1.94	129	4801	312	293	0.192	141	25629	1049	39802	7.61
118	9773	542	617	0.467	130	4386	172	490	0.406	142	30225	1089	42971	3.008
119	11463	607	4127	0.251	131	7914	701	706	0.508	143	69225	574	97574	1.112
120	13646	583	155	0.083	132	8269	326	521	0.871	144	13146	798	21954	3.144
121	2558	909	105	0.026	133	5039	221	476	0.355	145	4823	354	7730	1.517
122	7666	467	126	1.031	134	12712	492	12327	0.641	146	5264	472	8296	1.341
123	5615	356	144	0.023	135	33429	701	41624	1.685	147	2141	206	2801	0.991



شکل ۹. نمودار دوتایی S/Al در مقابل Fe/Al به منظور مقایسه فرایندهای سولفیداسیون و پیریتی شدن در نمونه‌های سنگ کل گمانه UU-38 از کانسار زرشوران و مقایسه آن با داده‌های به دست آمده از ذخایر طلا با میزان رسوبی در نوادا (امریکا) (Ye et al., 2003). چنان‌که مشاهده می‌شود، افزایش عیار طلا (مثلث قرمز) منطبق با افزایش سولفور (فرایند سولفیداسیون) در محیط است و اضافه شدن پیریت به محیط (پیریتی شدن) عیارهای پایین‌تری از طلا (کمتر از ۱ گرم در تن) را موجب می‌شود. در این نمودار، Fe و S نسبت به Al نرمال شده‌اند. نمودار پایه از کسler و همکاران (Kesler et al., 2003) اقتباس شده است.

**Fig. 9.** Binary diagram of S/Al vs. Fe/Al to compare the processes of sulfidation and pyritization in UU-38 drill hole of the whole rock samples from Zarshuran deposit and comparison with data from the sediment-hosted gold deposit in Nevada (America) (Ye et al., 2003). Based on, the increase of gold grade (red triangle) corresponds to the increase in sulfur (sulfidation process) in the environment, and the addition of pyrite to the environment (pyritization) causes lower grades of gold (< 1 ppm). Note: Fe and S are normalized to Al. The base diagram from Kesler et al (2003).



شکل ۱۰. A: نمودار دوتایی بین محتوای طلا و درجه سولفیداسیون یا DOS در نمونه‌های سنگ کل کانسار زرشوران و B: نمودار جعبه‌ای تغییرات عیار طلا در انواع مختلف پیریت توسط روش تجزیه نقطه‌ای

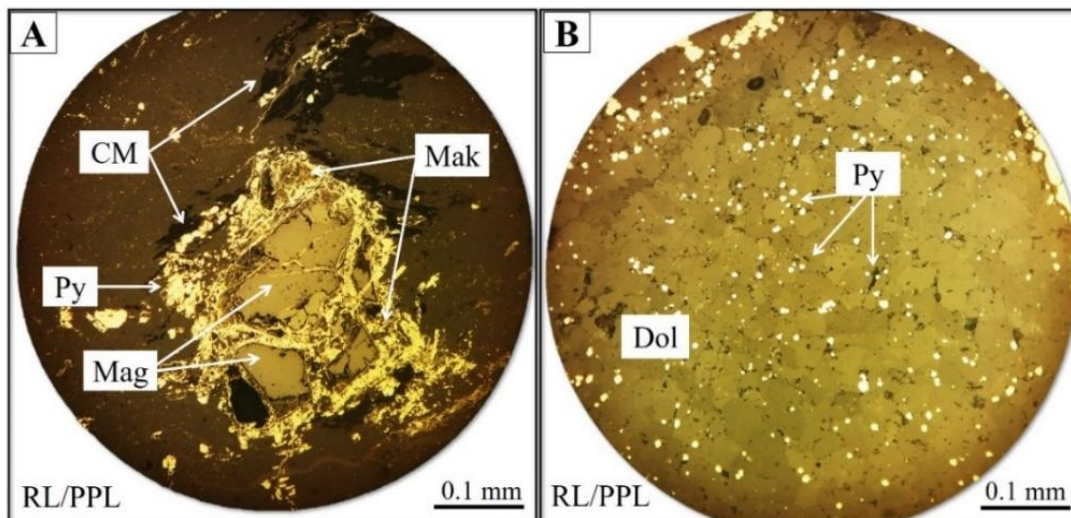
**Fig. 10.** A: Binary diagram between gold content and degree of sulfidation (DOS) in whole rock samples of Zarshuran deposit, and B: Box diagram of gold grade changes in different pyrite types by microprobe analysis

می‌شود. آهن واکنش‌پذیر در اکسیدهای آهن، هیدروکسیدهای آهن، رس و به ویژه کربنات‌های غنی از آهن (نظیر آنکرایت، سیدریت و دولومیت آهن‌دار) وجود دارد (Hofstra et al., 1991). کربنات‌زدایی یا سولفیداسیون سنگ میزبان (سولفیدزدایی سیال) یکی از مهم‌ترین فرایندهای اصلی شکل‌گیری کانسنگ در ذخایر طلا با میزبان رسوبی است. پیریت می‌تواند به طور مستقیم از طریق انتقال فازهای نیمه پایدار مونوسولفید آهن (نظیر FeS آمورف، ماکیناویت و پیروتیت) توسط فرایندهای مختلف (نظیر خروج  $H_2S$  و از دست دادن آهن)، شکل‌گیرد (شکل ۱۱-A). در مقابل، پیریت حاصل از جانشینی کربنات‌ها می‌تواند به طور مستقیم بر روی سطح کانی جانشین شده بدون حضور فازهای نیمه پایدار اولیه تشکیل شود (Qian et al., 2010) (شکل ۱۱-B). طبق این بررسی‌ها، در نتیجه تجزیه ترکیب‌های اکسیژن‌دار (نظیر مگنتیت) مقادیری آهن دوظرفیتی در محیط آزاد شده و با توجه به احیای مواد آلی در محیط و آزاد شدن  $S^{2-}$  و  $H_2S$  از این فرایند، به سرعت آهن با گوگرد محیط وارد واکنش شده و اولین فرآورده‌های سولفیدی آهن‌دار آمورف نظیر ماکیناویت ( $Fe_9S_8$ ) ایجاد می‌شود (شکل ۱۱-A).

### دیاژنز سامانه Fe-C-S و تشکیل ذخیره

کربنات آهن‌دار می‌تواند یکی از محصولات دیاژنز در سنگ‌های رسوبی کربن‌دار باشد (Berner, 1981). کربنات آهن‌دار دیاژنتیکی در سه منطقه شکل می‌گیرد: ۱) محیط‌های حاوی متان که در آن سولفات آبگین تخلیه می‌شود، ۲) در محیط‌های اکسیده به وسیله اکسایش یا کربوکسیل‌زدایی حرارتی ماده آلی و ۳) محیط‌های آتشفشانی که در آن  $CO_2$  از یک ماگمای سازنده به دریاچه‌های دهانه آتشفشان وارد می‌شود (Giggenbach, 1990). ماده آلی نیز یک مخزن برای سولفور گرمایی است و می‌تواند یک کنترل بر روی ته‌نشست Au را اعمال کند (Kettler et al., 1990)؛ اما فراوانی بالای Fe در محیط باعث می‌شود که ماده آلی به صورت یک مخزن مهم برای  $H_2S$  عمل کند. ظرفیت محیط برای مصرف  $H_2S$ ، ناپایداری کمپلکس‌های  $Au(HS)_2^-$  و ته‌نشست Au توسط مقدار Fe غیر سولفیدی موجود در سنگ کنترل می‌شود. تعامل سیال گرمایی غنی از  $H_2S$  با آهن واکنش‌پذیر که از سنگ میزبان (Cail and Cline, 2001) یا سیال گرمایی اضافه شده (Kesler et al., 2003) منشأ می‌گیرد، به تشکیل پیریت غنی از Au و As منجر





**شکل ۱۱.** تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی عادی، PPL) از شکل‌گیری پیریت‌ها در کانسار زرشوران. A: تشکیل پیریت از طریق انتقال فازهای مونوسولفید آهن نظیر ماکیناویت و B: تشکیل پیریت‌های افشان دانه‌ریز در میان دولومیت‌های آهن‌دار بدون حضور مونوسولفیدهای آهن. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (CM: مواد آلی کربن‌دار، Dol: دولومیت، Mak: ماکیناویت، Py: پیریت، Mag: مگنتیت).

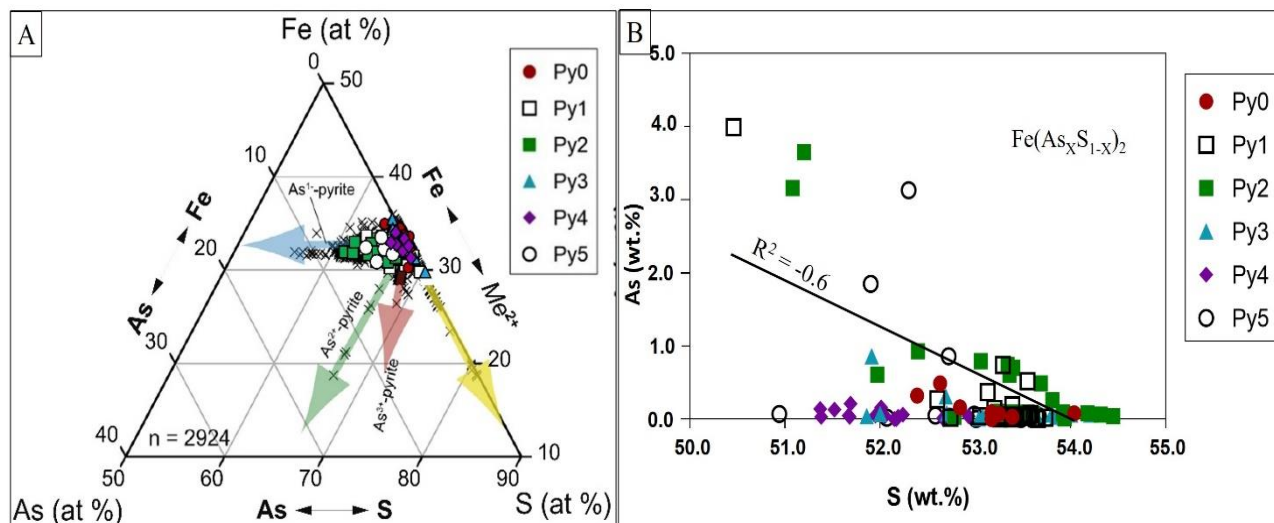
**Fig. 11.** Photomicrographs (reflected polarized light, PPL) of pyrite formation in the Zarshuran deposit. A: Pyrite formation through conversion of Fe-monosulfide phases such as Mackinawite, and B: The formation of fine-grained disseminated pyrite in Fe-rich dolomites without Fe-monosulfides. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (CM: Carbonaceous materials, Dol: Dolomite, Mak: Mackinawite, Py: Pyrite, Mag: Magnetite).

می‌شود و در نتیجه به صورت  $As^-$  است که گونه‌های  $As$  رایج در پیریت‌های کانسارهای طلا با میزان رسوبی هستند (Simon et al., 2005; Reich et al., 1999). سایر گونه‌های اکسیدمانند  $As^{2+}$  یا  $As^{3+}$  باید جانشین آهن شوند. این مشاهده با یافته‌های موجود در پیریت‌های آرسنیک‌دار طبیعی و آزمایشگاهی مطابقت دارد (Deditius et al., 2014). در طبیعت، رخداد گونه‌های مختلف  $As$  در پیریت گرمایی را می‌توان به تغییرات فوگاسیته اکسیژن نسبت داد. تحت شرایط اکسیدی، اغلب برای سامانه‌های سولفیداسیون بالا، کاتیون  $As^{2+}$ ،  $As^{3+}$  گونه غالب در پیریت آرسنیک‌دار است (Qian et al., 2010; Dedtitius et al., 2014)؛ در حالی که جایگزینی آنیون  $As^-$  در محیط‌های احیایی اغلب شبیه کانسارهای طلا با میزان رسوبی است. رفتار مشابه اتصال  $As$  به پیریت در طول جانشینی آزمایشگاهی کربنات و پیریت از ذخایر طلا با میزان رسوبی، این ایده کلی را تأیید می‌کند که پیریت آرسنیک‌دار مرحله کانه‌زایی از جانشینی کربنات‌های آهن‌دار

پیریت مرحله کانه‌زایی در ذخایر طلا با میزان رسوبی، دارای غلظت بالایی از آرسنیک است (بیشینه تا ۱۹ درصد وزنی) که رخداد طلا را کنترل می‌کند (Deditius et al., 2014). آرسنیک در پیریت می‌تواند در حالت‌های مختلف اکسایش رخ دهد که متناظر با جایگاه‌های مختلف بلورشناسی در شبکه و سازوکارهای مختلف جانشینی است: جانشینی  $As^-$  برای  $S^{2-}$  در شرایط احیایی و اغلب در ذخایر طلا با میزان رسوبی یافت می‌شود؛ در حالی که کاتیون‌های  $As^{2+}$ ،  $As^{3+}$ ،  $As^{5+}$  جانشین  $Fe^{2+}$  در شرایط اکسایش می‌شود (Reich et al., 2005). بر این اساس، طبق نمودار سه‌تایی Fe-As-S بر حسب درصد اتمی (شکل ۱۲-۱۱)، آرسنیک در ترکیب پیریت‌های مختلف کانسار زرشوران منطبق با آنیون  $As^-$  یا شرایط احیایی است. همچنین، نمودار دو‌تایی آرسنیک در مقابل گوگرد (شکل ۱۲-۱۱) نشان می‌دهد که غلظت  $As$  در پیریت‌های شکل گرفته، به شدت با کاهش غلظت گوگرد مرتبط است. از این همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که  $As$  جایگزین  $S$  در ساختار پیریت

می‌شود گونه‌های  $As^{3+}$  به صورت  $As^{3+}(OH)_3$  یا به صورت کمپلکس‌های سه ظرفیتی در حضور  $H_2S$  و pH پایین به  $As^-$  تبدیل شده و در ساختمان پیریت جانشین شوند.

موجود در سنگ‌های میزان رسوبی به دست می‌آید. تشکیل پیریت آرسنیک‌دار (هم‌زمان با غنی‌سازی Au) در محیط‌های کم دما اغلب مرتبط با فرایندهای سطحی است (Qian et al., 2010) که موجب

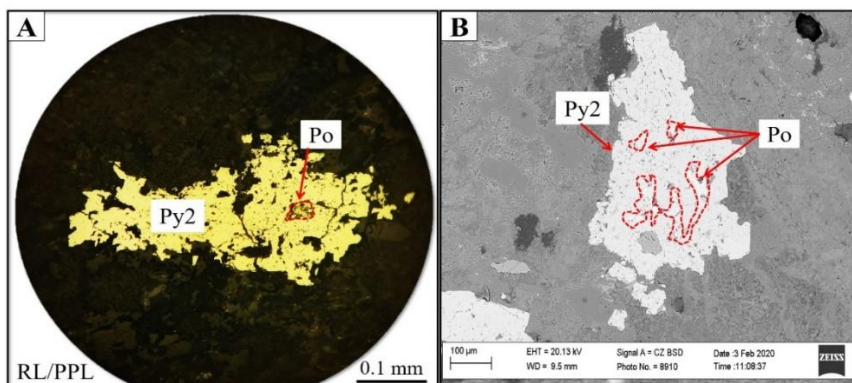


شکل ۱۲. A: نمودار سه‌تایی Fe-As-S (Deditius et al., 2014) که در آن روند پراکندگی پیریت‌های کانسار زرشوران (در راستای آرسنیک احیا) را در مقایسه با دیگر پیریت‌های ذخایر کارلین (علامت ضربدر) نشان می‌دهد (فلش زرد رنگ جانشینی فلزهای دو ظرفیتی در آهن را نشان می‌دهد) و B: همبستگی منفی بین عناصر As و S در پیریت‌های مختلف کانسار زرشوران را نشان می‌دهد که ترکیب پیریت به صورت  $Fe(As_xS_{1-x})_2$  بوده که در آن  $As^-$  جانشین گوگرد شده است.

**Fig. 12.** A: Fe-As-S ternary diagram (Deditius et al., 2014) from distribution of various pyrites of the Zarshuran deposit (reduced  $As^-$  species) compared to other pyrites of Carlin deposits (cross sign) (yellow arrow shows divalent metals  $Me^{2+}$  for Fe), and B: The negative correlation between As and S elements in different pyrites of the Zarshuran deposit indicates that the pyrite composition is  $Fe(As_xS_{1-x})_2$  in which  $As^-$  is substituted in sulfur.

می‌شود. در مورد جانشینی کربنات آهن‌دار، آزادسازی محلی Fe هنگام انحلال کربنات (و علاوه بر آن ته‌نشینی سولفیدهای تأخیری) به شرایط دور از تعادل منجر می‌شود که در آن پیرویت ممکن است به عنوان فاز نیمه پایدار تشکیل شود. با افزایش زمان واکنش، سامانه متعادل می‌شود و پیریت به صورت فاز پایدار سولفید شکل می‌گیرد. با این وجود، تبدیل پیرویت به پیریت، پیچیده است و بقایای پیرویت می‌تواند به صورت ادخال‌هایی در پیریت مشاهده شود که ویژگی آن بافت‌های رورشدی و درهم‌رشدی است (شکل ۱۳-A و B).

طبق پژوهش‌های چیان و همکاران (Qian et al., 2010) تشکیل فازهای سولفیدی را می‌توان با دو اثر مختلف توضیح داد: ۱) تکامل ترکیبی سامانه تحت شرایط تعادلی یا ۲) تشکیل پیرویت نیمه پایدار در شرایط عدم تعادل. در حالت اول، فازهای کانیایی مختلف (نظیر پیریت، پیرویت و مگنتیت) به طور مستقیم از پایداری ترمودینامیکی فازهای آهن‌دار در فوگاسیته پایین اکسیژن و کاهش فوگاسیته  $H_2S$  ناشی می‌شوند. در حالت دوم، پیریت اغلب از فاز سولفیدی اولیه از طریق مسیرهای مختلفی نظیر پلی‌سولفید شدن، از دست دادن آهن یا فرایند سولفیداسیون تشکیل



شکل ۱۳. A: تصویر میکروسکوپ (نور بازتابی عادی، PPL) از پیریت درشت بلور (Py2) و B: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ادخال پیروتیت در پیریت‌های افشان دانه‌درشت (Py2) کانسار زرشوران. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Po: پیروتیت، Py: پیریت).

**Fig. 13.** A: Photomicrographs (reflected polarized light, PPL) of the coarse-grain pyrite, and B: BSE images of pyrrhotite inclusions in coarse-grained disseminated pyrite (Py2) of the Zarshuran deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Po: Pyrrhotite, Py: Pyrite).

## نتیجه‌گیری

اسفالریت گل کلمی گویای نقش مهم رخداد فرایند سولفیداسیون سنگ میزبان در کانه‌زایی طلاست. همچنین، وجود همبستگی عیار طلا و درجه سولفیداسیون بیانگر آن است که فرایند سولفیداسیون، مهم‌ترین سازوکار ته‌نشست طلا در کانسار زرشوران بوده و در مقایسه با دگرسانی پیریتی شدن به مراتب نقش مؤثرتری داشته است.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

## قدردانی

از همکاری صمیمانه مدیریت معدن طلا زرشوران، به ویژه آقای مهندس رشیدنیا به دلیل راهنمایی‌های مفیدشان تشکر می‌شود. همچنین از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای ارائه نظرهای مفید و سازنده صمیمانه قدردانی می‌شود.

در کانسار زرشوران کانه‌های سولفیدی مختلفی نظیر پیریت آرسنیک‌دار، اورپیمنت-رآلگار، آرسنوپیریت، اسفالریت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیروتیت و ماکیناویت وجود دارد. در این کانسار، پیریت آرسنیک‌دار یکی از کانه‌های اصلی میزبان طلاست که از تعامل سیال گرمابی غنی از  $H_2S$  با دولومیت‌های آهن‌دار سنگ میزبان شکل گرفته است. حضور طلای نامرئی در ساختمان پیریت‌های آرسنیک‌دار کانسار زرشوران بیانگر آن است که سیال کانه‌ساز اولیه در هنگام تکوین تحت اشباع از طلای آزاد ( $Au^0$ ) بوده است. در صورتی که اشباع طلا برای تشکیل کانسار مورد نیاز باشد، تنها مقادیر طلا بیش از حد حلالیت طلا ته‌نشین شده و بخش عمده‌ای از طلای محلول ( $Au^+$ ) به طور بالقوه در ترکیب سیال اولیه باقی می‌ماند. از سوی دیگر، ته‌نشینی طلا از سیال تحت اشباع به انتقال مقدار زیادی از طلا از ترکیب سیال به ساختمان پیریت آرسنیک‌دار منجر خواهد شد. در کانسار زرشوران، مقادیر بالای طلای آزاد ( $Au^0$ ) همراه با رگه‌های تأخیری اورپیمنت-رآلگار و

1. Carlin-style
2. Carlin-like
3. Scanning Electron Microscopy (SEM)
4. Electron Probe Micro-Analysis (EPMA)
5. Geo Forschungszentrum (GFZ)

## References

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Alipour, R., Tale Fazel, E. and Farhani Moghadam, M., 2020. The role of right-lateral shear zone and fractures related to folding in development of Zarshuran gold deposit, Takht-e-Soleyman complex, northern Takab. *Journal of Economic Geology*, 12(2): 131–155. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v12i2.75702>
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35(7): 656–671. <https://doi.org/10.1007/s001260050269>
- Bagby, W.E. and Berger, B.R., 1985. Geologic characteristics of sediment-hosted, disseminated precious-metal deposits in the western United States. In: B.R. Berger and P.M. Bethke (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal systems*. Society of Economic Geology, Reviews in Economic Geology, pp. 169–202. <https://doi.org/10.5382/Rev.02.08>
- Berner, R.A., 1981. A new geochemical classification of sedimentary environments. *Journal of Sedimentary Research*, 51(2): 359–365. <https://doi.org/10.1306/212F7C7F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Cail, T.L. and Cline, J., 2001. Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada. *Economic Geology*, 96(6): 1343–1361. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.6.1343>
- Cline, J.S., Hofstra, A.H., Muntean, J.L., Tosdal, R.M. and Hickey, K.A., 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geology 100th anniversary volume*. Society of Economic Geologist, Littleton, CO, pp. 451–484. <https://doi.org/10.5382/av100.15>
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x>
- Daliran, F., Hofstra, A., Walther, J. and Topa, D., 2018. Ore Genesis Constraints on the Agdarreh and Zarshuran Carlin-Style Gold Deposits in the Takab Region of Northwestern Iran. In: J.L. Muntean (Editor), *Diversity of Carlin-Style Gold Deposits*. Society of Economic Geology, Reviews in Economic Geology, pp. 299–333. <https://doi.org/10.5382/rev.20.09>
- Deditius, A.P., Rich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Chryssoulis, S. L., Walshe, J. and Ewing, R.C., 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140: 644–670. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.045>
- Dickson, J. and Coleman, M.L., 1980. Changes in carbon and oxygen isotope composition during limestone diagenesis. *Sedimentology*, 27(1): 107–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01161.x>
- Giggenbach, W.F., 1990. Water and gas chemistry of Lake Nyos and its bearing on the eruptive process. *Journal of Volcanology and Geothermal Resource*, 42(4): 337–362. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90031-A](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90031-A)
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Oberhansli, R., Mocek, B. and Altenberger, U., 2011. Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran. *Geological Magazine* 148(2): 250–268. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000683>
- Heshmatnia, Sh., 2021. Classification, chemical composition and sulfur stable isotope constraints of pyrites from the Zarshuran deposit (north Takab) with special reference to gold formation mechanism. M.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 178 pp. (in Persian with English abstract)
- Hofstra, A.H. and Cline, J.S., 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Reviews in Economic Geology, pp. 163–220. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.05>
- Hofstra, A.H., Leventhal, J.S., Northrop, H.R., Landis, G.P., Rye, R.O., Birak, D.J. and Dalh, A.R., 1991. Genesis of sediment-hosted disseminated gold deposits by fluid mixing and sulfidation: Chemical reaction path modeling of ore-depositional processes documented in the Jerritt Canyon district, Nevada. *Geology*, 19(1): 36–40.



- [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0036:GOSHDG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0036:GOSHDG>2.3.CO;2)
- Karimi, M., 1993. Petrographic-mineralogical studies and the genesis of the Au-As ore at Zarshuran, Takab. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, 264 pp. (in Persian with English abstract)
- Kavoshgaran, Consulting Engineers., 2013. Prospecting and exploration preliminary study of the peripheral Zarshuran gold mine. Iranian Mines and Mineral Industries Development and Renovation Organization, Tehran, Report no. 98901, 499 pp. (in Persian)
- Kesler, S.E., Fortuna, J., Ye, Z., Alt, J.C., Core, D.P., Zohar, P., Borhauer, J. and Chryssoulis, S.L., 2003. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold, Screamer section of the Betze-Post Carlin-type deposit, Nevada. *Economic Geology*, 98(6): 1137–1157. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.6.1137>
- Kettler, R.M., Waldo, G.S., Penner-Hahn, J.E., Meyers, P.A. and Kesler, S.E., 1990. Sulfidation of organic matter associated with gold mineralization, Moore orebody, Pueblo Viejo, Dominican Republic. *Applied Geochemistry*, 5(1–2): 237–248. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90051-6)
- Madan-Zamin Company, 2020. Modeling and updating report of rock estimation at the Zarshuran mine. Iranian Mines and Mineral Industries Development and Renovation Organization, Tehran, Report no. MO-9812-04, 35 pp. (in Persian)
- Maynard, J.B., 1982. Extension of Berner's "New geochemical classification of sedimentary environments" to ancient sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52(4): 1325–1331. <https://doi.org/10.1306/212F812F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696. <https://doi.org/10.1007/s001260050227>
- Palenik, C.S., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S.E., Wang, L. and Ewing, R.C., 2004. "Invisible" gold revealed: Direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit. *American Mineralogist*, 89(10): 1359–1366. <https://doi.org/10.2138/am-2004-1002>
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, London, 1273 pp.
- Qian, G., Brugger, J., Skinner, W.M., Chen, G. and Pring, A., 2010. An experimental study of the mechanism of the replacement of magnetite by pyrite up to 300°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(19): 5610–5630. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.06.035>
- Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C.S., Chryssoulis, S.L. and Ewing, R.C., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>
- Samimi, M., 1992. Recognizance and preliminary exploration in the Zarshuran. Kavoshgaran Consulting Engineers, Tehran, 220 pp. (in Persian)
- Shenberger, D.M. and Barnes, H.E., 1989. Gold solubility in aqueous sulfide solutions from 150 to 350 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2): 269–278. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90379-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90379-7)
- Simon, G., Kesler, S.E. and Chryssoulis, S., 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creek, Nevada: implication for deposition of gold in Carlin-type deposits. *Economic Geology*, 94(3): 405–422. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.3.405>
- Tale Fazel, E., 2022. Major and trace elements geochemistry of pyrite: Implications for exploration of invisible gold deposits in the Takab-Angouran district, NW Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 7(2): 57–69. (in Persian with English abstract) Retrieved July 20, 2022 from <https://gnf.khu.ac.ir/article-1-2800-fa.html>
- Voute, F., Steffen, H., Noreen, E. and Carlos, V., 2019. Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Patay-Parcoy district, Peru: implication for paragenesis, fluid source, and gold deposition mechanisms. *Mineralium Deposita*, 21(7): 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0857-6>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wong, P.K. and Oldershaw, A., 1981. Burial cementation in the Devonian Kaybob Reef Complex, Alberta, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 51(2): 507–520. <https://doi.org/10.1306/212F7CC5-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Ye, Z., Kesler, S.E., Essene, E.J., Zohar, P.B. and Borhauer, J.L., 2003. Relation of Carlin-type gold mineralization to lithology, structure and alteration: Screamer zone, Betze-Post deposit, Nevada. *Mineralium Deposita*, 38(1): 22–38.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-002-0265-8>

Zhou, Y.J. and Wang, K., 2003. Gold in the Jinya Carlin-type Deposit: Characterization and Implications. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(2): 83–100.  
<https://doi.org/10.4236/jmmce.2003.22008>