Vol. 17, No. 1, 2025, pp. 81–104 ISSN (Print): 2008-7306 ISSN (Online): 2423-5865

Journal of Economic Geology

https://econg.um.ac.ir

RESEARCH ARTICLE 10.22067/econg.2025.1132 OPEN ACCESS

Geochemistry and Mineralogy of Zincian Dolomite in the Tangedozdan area (Fereydounshahr- West of Isfahan Province)

Seyed Vahid Shahrokhi [1 *]

[1]Associate Professor, Department of Geology, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 18 October 2024
Revised: 18 January 2025
Accepted: 20 January 2025

Keywords

Geochemistry
Mineralogy
Zincian-dolomite
Smithsonite
Tangedozdan
Sanandaj-Sirjan zone

***Corresponding author**

Seyed Vahid Shahrokhi
✉ vahid.shahrokhi@iau.ac.ir

ABSTRACT

The Tangedozdan zinc and lead deposit is located 25 km northeast of Fereydounshahr and in the middle part of the Sanandaj-Sirjan zone. The rock units from old to new include greenish volcanics, calcareous sandstone, crystalline limestone, limestone to dolomitic limestone, and gray limestone belonging to the Jurassic-Cretaceous and alluviums of the Holocene time. The limestone to dolomitic limestone unit with normal contact sits on greenish volcanic and hosts zinc mineralization. The Zincian-dolomite in this area can be recognized by different amounts of zinc, smaller amounts of lead and, cadmium in its structure. In the studied area, a set of formed zinc and fewer lead ores, the most important in the exogenous part are smithsonite, hemimorphite, and cerussite, and in the endogenous part are sphalerite and, pyrite. Performing XRD analysis with the conventional method shows the presence of dolomite, smithsonite, and sphalerite. By changing the decomposition conditions, the structure parameters in Zincian-dolomites increased simultaneously with the amount of zinc, based on of this, there is a direct relationship between the zinc amount in the dolomite and the structure parameters. The study of the Zincian-dolomite sample by differential thermometry method shows the reduction of endothermic point and the zinc effect substitution in the dolomite structure. EPMA analysis of Zincian-dolomite samples show the substitution of Mg with Zn. Based on this, the replacement of dolomite by exogenous zincian-dolomite is a part of the mineralization process, and with the progress of zincian-dolomite formation and dolomitization, it eventually leads to the formation of non-sulfide zinc minerals such as smithsonite.

How to cite this article

Shahrokhi, S.V., 2025. Geochemistry and Mineralogy of Zincian Dolomite in the Tangedozdan area (Fereydounshahr- West of Isfahan Province). Journal of Economic Geology, 17(1): 81–104. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.2025.1132

©2025 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

Based on reproductive indices, the nonsulfide zinc and lead deposits are divided into two main groups, endogenous and exogenous, mineralogical characteristics, and geological characteristics (Hitzman et al., 2003). Non-sulfide zinc minerals, known as calamine, combine of exogenous zinc minerals with lead non-sulfide minerals, hydroxide cherts, and silicates (Boni and Mondillo, 2015; Luke et al., 2015; Newton, 2013). According to previous studies, the Tangedozdan zinc and lead deposit with carbonate host rock of the Mississippi Valley-type (Delavar et al., 2014) consists of exogenous non-sulfide zinc minerals (Amiri and Shahrokhi, 2023). The identification and study of zinc dolomites, considering their close relationship with non-sulfide minerals, in addition to the introduction of this collection, can be effective in broadening the exploration work and lead to an increase in accuracy Tangedozdan area in the west of Isfahan province, 10km from Fereydounshahr city and, in the vicinity of Tangedozdan between longitudes 49˚56'30" to 49˚57'30" east and latitudes 32˚02' to 32˚03' north and, is located in the middle part of the Sanandaj-Sirjan zone. Rocks in 1/20000 geological map include volcanic (JK^{v}), sandstone (JK^{s}), crystalline limestone (C.L.S), limestone to dolomitic limestone ($JK^{l,dl}$) and limestone (K_l^{1}) belonging to the Jurassic-Cretaceous and the sediments of the Holocene time (Q^{a} and Q^{sc}) the JK^{v} unit is the oldest rock, consisting of Trachyandesite to andesite volcanic rocks. The $JK^{l,dl}$ unit hosts mineral matter and consists of limestone to thick dolomitic limestone. It is located east of Tangedozdan with normal contact on the JK^{v} unit and hosts zinc carbonate mineralization.

Materials and methods

Chemical analysis has been done for 30 samples taken by ICP-MS method in the laboratory of the Iran Minerals Research and Processing Center. 10 samples were also analyzed by XRD in the Zarazma and Binaloud laboratory. Thermal analysis was done by DTA/TGA in the Iran Minerals Research and Processing Center laboratory.

To investigate the chemistry of the samples, 36 points were subjected to EPMA analysis in the Potsdam University Laboratory, Germany.

Result

In the Tangedozdan area, the most important zinc and lead minerals in the exogenous part are smithsonite, hemimorphite, and cerussite, and in the endogenous part sphalerite and to a lesser extent galena and pyrite.

In the study area, three types of dolomites can be distinguished based on the color visible in the field. The first type is dark-colored dolomite. The second type is yellow to brown, which can be due to the exogenous oxidation of Fe^{2+} in the dolomite structure (Zabinski, 1980; Motavali et al., 2019; Yang et al., 2019).

Discussion

Based on these analyses, the main minerals are dolomite, smithsonite, sphalerite, and pyrite, secondary minerals are cerusite, hematite, quartz, barite, calcite, and rare minerals are galena, and muscovite, illite. Standard dolomite was checked and identified with cart number 036-0426 and with the help of Xpert high surplus software. Based on the Rietveld method in Maud software, two samples were analyzed and were calculated by the structure a and c parameters (Monecke et al., 2001). The selected samples have different amounts of zinc. Based on this, the lattice parameters a and c in TBA-14 sample with 2.10% zinc value are respectively a=4.8092Å and c=16.0200Å for the TBA-14 sample with 3.05% zinc value a=4.8130Å and c=16.0233 Å, and for the TBA-19 sample with 3.56% zinc, a=4.8170 Å and c=16.0310 Å were determined, respectively. The results related to pure calcite and pure dolomite. The results of differential calorimetry of two dolomite samples TBA-14 and TBA-19 from the Tangedozdan area are compared. Sample No. TBA-14 with 10.2 ppm of zinc element and the endothermic peak occurred at the approximate temperature of 503 ºC and 595 ºC, and a slight decrease of about 15% can be seen at the beginning of the peak at the temperature of 126 ºC. Also, in the TBA-19 sample, which mostly contains zinc dolomite, there are two reactive peaks at 447ºC and 509ºC, followed by two other reactive peaks at 584ºC and 674ºC. Accordingly, increasing the amount of zinc in the dolomite structure causes a decrease in the reaction point in the form of a non-linear curve, while in iron-containing samples such as Ankerite, most of the reaction curves are linear (Kulp et al., 1951). In this way and based on this test, the presence of zinc

in dolomites and the formation of zincian dolomite in the Tangedozdan area can be seen. To determine the composition, type, and origin of zinc in the Tangedozdan area, three samples were selected in such a way that based on the ICP-MS analysis performed on the samples, the first type of dolomite (TBA-15) a zinc content of 82 The second type dolomite sample (TBA-14) contains 2.10 ppm, and the third type dolomite zinc sample (TBA-19) contains 3.56 ppm. The results of the EPMA analysis show that in the TBA-19 (Zincian-dolomite), in addition to calcite and dolomite, the amount of zinc element is higher than the background limit and indicates the presence of zinc in the dolomite mineral structure. Based on these studies, three types of dolomites were detected, according to which the highest amount is related to Zincian-dolomite in the TBA-19 sample, followed by TBA-14 and TBA-15 dolomite. In the TBA-16, the ratio of Zn:Mg is from 0.4 to 0.16, while in the TBA-19 Zincian-dolomite sample, this value varies from 0.39 to 1.04. Based on the studies, Zincian-dolomite can be identified in the carbonate part along with zinc and lead non-sulfide mineralization in the Tangedozdan area. Zincian-dolomite shows the most distribution along with red to orange phase 3 dolomites. Based on this, Zincian-dolomite can be seen in the exogenous phase of the oxidation zone of the Tangedozdan area. Based on this, conducting different experiments in this area indicates the presence of zinc in the dolomite structure and the formation of zincian dolomite.

دوره ۱۷، شماره ۱، ۱۴۰۴، صفحه ۸۱ تا ۱۰۴ شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

زمین‌شناسی اقتصادی

https://econg.um.ac.ir

مقاله پژوهشی 10.22067/econg.2025.1132 OPEN ACCESS

زمین‌شیمی و کانی‌شناسی زینسین‌دولومیت در کانسار تنگ‌دزدان (فریدون‌شهر- غرب استان اصفهان)

سید وحید شاهرخی [1]*

[1] دانشیار، گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

واژه‌های کلیدی

زمین‌شیمی

کانی‌شناسی

زینسین‌دولومیت

اسمیت‌زونیت

تنگ‌دزدان

پهنه سنندج- سیرجان

نویسنده مسئول

سید وحید شاهرخی

vahid.shahrokhi@iau.ac.ir

چکیده

کانسار روی و سرب تنگ‌دزدان در ۲۵ کیلومتری شهرستان فریدون‌شهر و در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان قرار دارد. واحدهای سنگی از قدیم به جدید شامل ولکانیک‌های سبزرنگ، ماسه‌سنگ آهکی، آهک بلورین، آهک تا آهک دولومیتی و آهک خاکستری متعلق به ژوراسیک- کرتاسه و آبرفت‌های عهد حاضر هستند. واحد آهک تا آهک دولومیتی با تماس عادی بر روی ولکانیک‌های سبزرنگ قرار داشته و میزبان کانی‌سازی روی است. در این ناحیه زینسین‌دولومیت توسط مقادیر متفاوتی از روی و نیز مقادیر کمتری سرب و کادمیوم در شبکه آن قابل تشخیص است. در ناحیه مورد بررسی مجموعه‌ای از کانه‌های روی و به مقدار کمتر سرب تشکیل‌شده است که مهم‌ترین آنها در بخش برون‌زاد شامل اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت و سروزیت و در بخش درون‌زاد اسفالریت و پیریت هستند. انجام تجزیه پراش پرتو ایکس با روش مرسوم نشان‌دهنده حضور دولومیت، اسمیت‌زونیت و اسفالریت است. با تغییر شرایط تجزیه و با افزایش میزان روی در زینسین‌دولومیت‌ها، مؤلفه‌های شبکه‌ای نیز افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین میزان روی در شبکه دولومیت با مؤلفه‌های شبکه‌ای است. بررسی نمونه زینسین‌دولومیت به روش دماسنجی تفاضلی نشان‌دهنده کاهش نقطه گرماگیر و تأثیر جانشینی روی در ساختار دولومیت است. تجزیه نقطه‌ای نمونه‌های زینسین‌دولومیت نشان‌دهنده جانشینی منیزیم با روی است. بر این اساس، جانشینی دولومیت توسط زینسین‌دولومیت برون‌زاد بخشی از فرایند کانی‌سازی بوده و با پیشرفت فرایند تشکیل زینسین‌دولومیت و دولومیت‌زدایی در نهایت به تشکیل کانی‌های غیرسولفیدی روی مانند اسمیت‌زونیت منجر می‌شود.

استناد به این مقاله

شاهر خی، سید وحید، ۱۴۰۴. زمین‌شیمی و کانی‌شناسی زینسین‌دولومیت در کانسار تنگ‌دزدان (فریدون‌شهر- غرب استان اصفهان) . زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۱): ۸۱-۱۰۴. https://doi.org/10.22067/econg.2025.1132

مقدمه

به طور کلی، تعیین نحوه تشکیل و شناخت کانی‌ها نیازمند بررسی ارتباط آنها با یکدیگر است. کانسارهای روی و سرب غیرسولفیدی حاصل اکسایش کانسارهای روی و سرب سولفیدی است که اغلب از کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی روی و سرب تشکیل می‌شود (Mondillo et al., 2014; Slezak et al., 2014). این کانسارها بر اساس شاخص‌های زایشی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شناسی به دو گروه اصلی درون‌زاد و برون‌زاد تقسیم شده‌اند (Heyl and Boizon, 1962; Hitzman et al., 2003). نهشته‌های غیرسولفیدی روی برون‌زاد در اثر اکسایش کانی‌های سولفیدی اولیه و یا تمرکز کانی‌های روی در کارست‌ها و حفره‌ها و اغلب همراه با کانی‌های همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت و هیدروزینکیت تشکیل می‌شوند؛ در صورتی‌که انواع درون‌زاد وابسته به سیالات گرم بوده و کانی‌غالب آنها نیز ویلمیت، فرانکلینیت و زینکیت است (Reichert and Borg, 2008; Choulet et al., 2014; Paradis et al., 2015; Boni and Mondillo, 2015). کانی‌های غیرسولفیدی روی که به کالامین معروف هستند شامل ترکیبی از کانی‌های برون‌زاد روی همراه با کانی‌های غیرسولفیدی سرب، کربنات‌های هیدروکسیدی و سیلیکات هستند (Newton, 2013; Boni and Mondillo, 2015; Luke et al., 2015). تشکیل وسیع دولومیت در اطراف مناطق کانی‌سازی غیرسولفیدی روی قابل توجه است. همچنین کالامین و کانی‌های غیرسولفیدی طی فرایند دگرسانی در سنگ‌های سولفیدی سرب و روی در سنگ میزبان دولومیتی شکل می‌گیرند (Boni and Large, 2003; Mondillo et al., 2018; Fazli et al., 2018). کانی‌های برون‌زاد غیرسولفیدی همانند اسمیت‌زونیت در بخش بزرگی از کانسارهای سرب و روی ایران قابل مشاهده بوده که به عنوان نمونه می‌تواند به معدن عمارت (Ehya et al., 2010)، حوض‌سفید (Adelpour and Rostamipaydar, 2018) و بهرامتاج (Gholizadeh et al., 2021) اشاره کرد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده قبلی، کانسار تنگ‌دزدان یک کانسار روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی از نوع دره می‌سی‌سی‌پی است (Delavar et al., 2014) که از کانی‌های برون‌زاد غیرسولفیدی روی تشکیل‌شده است (Amiri and Shahrokhi, 2023). در کانسارهای ایران مرکزی همانند ایرانکوه و نخلک سنگ‌های کربناتی به سن کرتاسه نقشی مهم به عنوان میزبان کانه‌زایی سرب و روی دارند (Vaziri et al., 2012; Jazi et al., 2016; Boveiri Konari et al., 2016; Karimpour et al., 2017; Boveiri Konari and Rastad., 2017; Karimpour et al., 2019). همچنین سنگ میزبان کانه‌زایی در کمربند ملایر- اصفهان در کانسارهایی همانند کوه کلنگه نیز کربنات‌های کرتاسه پسین هستند (Peernajmodin et al., 2018).

زینسین‌دولومیت‌ها اغلب در مناطق دارای کانی‌سازی غیرسولفیدی روی و سرب قابل مشاهده بوده و مینرکوردیت ($CaZn(CO_3)_2$) نیز در شرایط معمول تشکیل کربنات‌ها، به عنوان کانی نیمه‌پایدار محسوب می‌شود (Mondillo et al., 2011). همراهی زینسین‌دولومیت با کانی‌های غیرسولفیدی و رخداد آن در کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان دولومیتی در کانسارهای مختلفی همانند کانسارهای روی و سرب ناحیه ساردینا ایتالیا، جنوب چین، جبالی یمن و یانکو پرو گزارش‌شده است (Zabinski, 1980; Motavali et al., 2019; Yang et al., 2019). با این وجود اطلاعات اندکی در ارتباط با ساختار و زمین‌شیمی آنها وجود داشته و در ایران نیز با وجود کانسارهای مختلف سرب و روی، پژوهش‌های نادری در خصوص زینسین‌دولومیت‌ها و کانی‌های وابسته به مینرکوردیت انجام‌شده است.

شناسایی و بررسی زینسین‌دولومیت‌ها با توجه به ارتباط نزدیک آنها با کانی‌های غیرسولفیدی، علاوه بر معرفی این مجموعه، می‌تواند در وسعت‌بخشی به کار اکتشاف مؤثر بوده و به افزایش دقت منجر شود. بر این اساس، در این پژوهش، ضمن بررسی زینسین‌دولومیت‌های موجود در سنگ‌های کربناته همراه با

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

کانی‌سازی غیرسولفیدی روی در ناحیه تنگ‌دزدان، ویژگی‌های زمین‌شیمی و چگونگی ارتباط آنها با دولومیت‌های اولیه و نیز کانی‌های غیرسولفیدی روی مورد بررسی قرار می‌گیرد. انجام بررسی بر روی زینسین‌دولومیت‌ها علاوه بر موارد بیان‌شده، می‌تواند مکمل سایر داده‌ها در اکتشاف کانسارهای روی بوده و به عنوان ردیاب مناسب برای اکتشاف در نظرگرفته شود.

جایگاه جغرافیایی و زمین‌شناسی

کانسار تنگ‌دزدان در غرب استان اصفهان و در ۲۵ کیلومتری شهرستان فریدون‌شهر و در مجاورت روستای تنگ‌دزدان بین طول‌های ″۳۰ ′۵۶ °۴۹ تا ″۳۰ ′۵۷ °۴۹ شرقی و عرض‌های ′۰۲ °۳۲ تا ′۰۳ °۳۲ شمالی، در منتهاالیه گوشه غربی استان اصفهان و در مجاورت استان لرستان واقع‌شده است. این ناحیه در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان و در گستره نقشه زمین‌شناسی ۱: ۲۵۰۰۰۰ گلپایگان (Thiele et al., 1967)، ۱: ۱۰۰۰۰۰ الیگودرز (Soheili et al., 1992) قرار دارد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده میزان عنصر روی موجود بین ۳ تا ۵ درصد، مقدار عنصر سرب کمتر از ۱/۵درصد بوده است (Amiri and Shahrokhi, 2017; Amiri and Shahrokhi, 2023).

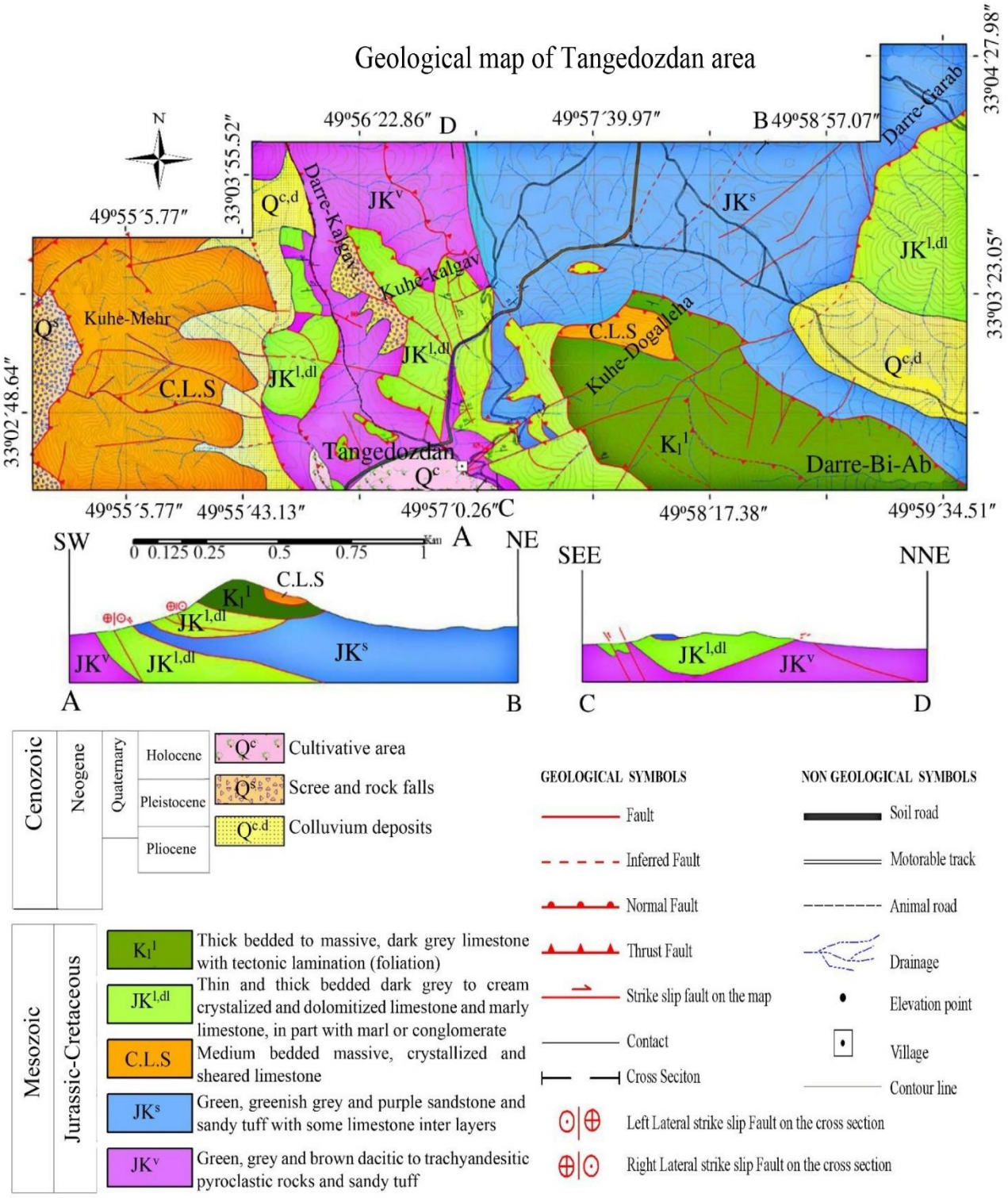
به منظور بررسی، توضیح و تفسیر واحدهای سنگی در ناحیه مورد بررسی، به کمک عکس‌های هوایی، تصویرهای ماهواره‌ای و همچنین پیمایش صحرایی و پس از بررسی و تجزیه و تحلیل واحدهای سنگی به کمک نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، نقشه زمین‌شناسی ۱: ۲۰۰۰۰ ناحیه مورد بررسی تهیه شد (شکل ۱). واحدهای سنگی موجود در نقشه زمین‌شناسی ۱: ۲۰۰۰۰ واحدهای سنگی موجود از قدیم به جدید شامل ولکانیک‌های سبزرنگ (JK^{v})، ماسه سنگ آهکی (JK^{s})، آهک بلورین (C.L.S)، آهک تا آهک دولومیتی ($JK^{l,dl}$) و آهک خاکستری (K_l^{1}) متعلق به ژوراسیک- کرتاسه و آبرفت‌های عهد حاضر (Q^{a} و Q^{sc}) هستند.

واحد JK^{v} متشکل از سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیت تا آندزیت به رنگ‌های سبز و قرمز مایل به خاکستری، قدیمی‌ترین واحد سنگی موجود در ناحیه مورد بررسی به حساب می‌آید (شکل ۲-A). ضخامت این واحد در حدود ۴۰ متر است که گاهی تحت‌تأثیر حرکت گسله، متحمل دگرشکلی‌های زمین‌ساختی شده؛ به طوری‌که سطوح ورقه‌ای سطح غالب N350/70 توسعه‌یافته است.

واحد JK^{s} به عنوان قدیمی‌ترین واحد رسوبی در ناحیه تنگ‌دزدان، متشکل از ماسه سنگ تا ماسه سنگ آهکی نازک تا متوسط لایه به رنگ خاکستری تا خاکستری متمایل به کرم با ضخامت حدود ۲۰ متر با شیب لایه‌بندی غالب به سوی شمال‌شرقی است (شکل ۲-B). واحد C.L.S به صورت سنگ‌های آهکی به شدت خردشده و بلورین در بخش غربی گستره مورد بررسی گسترش‌داشته است و متوسط لایه تا توده‌ای و به رنگ خاکستری تا کرم و گاهی سفید هستند (شکل ۲-C). عامل اصلی تبلور دوباره در این سنگ‌ها عملکرد زمین‌ساخت تراستی و تشکیل سامانه دوپلکسی است که متشکل از صفحه‌های راندگی بر روی یکدیگر در مقیاس‌های مختلف است. این واحد توسط گسل‌های متعدد، در جهت‌های مختلف بریده شده است. عملکرد نیروهای زمین‌ساختی تراستی باعث توسعه درزه‌های کششی در امتدادهای عمود بر آنها شده و رگه و رگچه‌های کلسیت توسعه یافته‌اند که باعث رنگ سفید تا کرم برای این سنگ‌ها شده است. این سنگ‌ها در اثر حرکت‌های زمین‌ساختی حاصل از سفره زمین‌ساختی در بردارنده آن، به شدت تجدید تبلور یافته‌اند. همان‌گونه که بر روی نقشه زمین‌شناسی نیز مشخص است، این واحد توسط گسل‌های متعدد، در جهت‌های مختلف بریده شده است (شکل ۱).

واحد $JK^{l,dl}$ متشکل از سنگ آهک تا سنگ آهک دولومیتی ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ خاکستری تا خاکستری متمایل به کرم است (شکل ۲-D) که ضخامت آن حدود ۲۸۰ متر است. این واحد به عنوان میزبان ماده معدنی بوده و حفاری‌های اکتشافی در آن به انجام‌رسیده‌است. این واحد در شرق روستای تنگ‌دزدان با تماس عادی بر روی واحد JK^{v} قرار دارد و میزبان کانی‌سازی کربناته روی است (شکل ۲-E).

DOI: 10.22067/econg.2025.1132



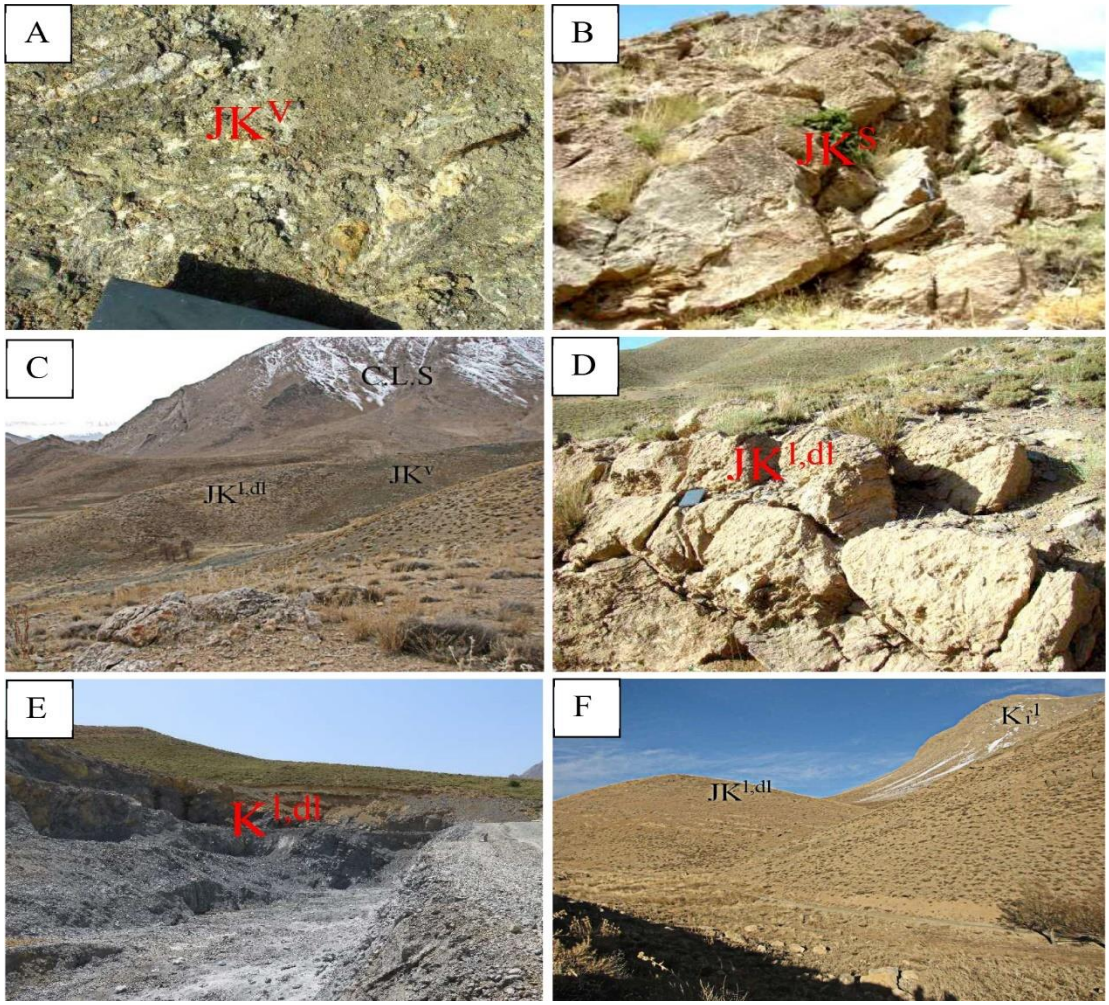
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ورقه ۲۰۰۰۰: ۱ ناحیه تنگ‌دزدان

Fig. 1. Geological map of Tangedozdan area 1:20000 sheet

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

در بخش‌های میانی این واحد و در غرب ترانشه‌های اکتشافی، قطعه‌هایی از جنس باریت شیری رنگ با گسترش سطحی محدود به اندازه تقریبی ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر قابل مشاهده است.

واحد K_1^l شامل سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ خاکستری تیره و گاهی نخودی بوده و که بخش‌هایی از آن در اثر حرکت‌های زمین‌ساختی بلورین شده است (شکل ۲-F). مرز این واحد با واحدهای زیرین گسلیده است و به نظر می‌رسد رخنمون آنها بخشی از سفره‌های روراندهای است که بقایای آن به صورت برش‌هایی در زون ساختاری سنندج- سیرجان دیده می‌شود. علاوه بر گسل قاعده این واحد، گسل‌های دیگری نیز به صورت عرضی این واحد را بریده‌اند.



شکل ۲. A: رخنمون واحد JK^v در نزدیکی روستای تنگ دزدان (عرض تصویر ۶۰cm)، B: رخنمون واحد JK^s در شرق ناحیه مورد بررسی، C: دورنمای گسترش واحد $JK^{l,dl}$، C.L.S و K_1^l در شرق روستای تنگ‌دزدان (دید به سمت جنوب‌شرق)، D: رخنمون واحد $JK^{l,dl}$ در نزدیکی روستای تنگ‌دزدان، E: سینه‌کار معدنی ایجاد شده در واحد $JK^{l,dl}$ و F: رخنمون واحد $JK^{l,dl}$ در کنار واحد K_1^l در شرق ناحیه مورد بررسی

Fig. 2. A: Outcrope of the JK^v unit in the near of the Tangedozdan village (Image width 60cm), B : Outcrope of the JK^s unit in the east of the Study area, C: The expansion perspective of $JK^{l,dl}$, C.L.S and K_1^l units in the east of Tangedozdan village (view towards the southeast), D: Outcrope of the $K^{l,dl}$ unit in the near of the Tangedozdan village, E: Mining chest created in $JK^{l,dl}$ unit, and F: Outcrop of $JK^{l,dl}$ and K_1^l units in the east of the studied area

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

روش مطالعه

برای بررسی کانه‌زایی روی و سرب و تهیه نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد بررسی با مقیاس ۲۰۰۰۰: ۱، بررسی صحرایی، نمونه‌برداری، بررسی میکروسکوپی واحدهای سنگی موجود و روابط بین آنها انجام‌شد. برای شناسایی دقیق و تعیین نوع کانی‌ها، ۳۰ مقطع نازک- صیقلی از نمونه‌های برداشت شده سطحی، گمانه‌ها و ترانشه‌ها تهیه و به وسیله میکروسکوپ پلاریزان عبوری- انعکاسی Nikon E200 در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه شیمیایی برای ۳۰ نمونه برداشت شده توسط دستگاه ICP-MS مدل Agilent7900 ساخت کشور امریکا با استاندارد آماده‌سازی D4698 در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران انجام‌شد. حد تشخیص روش تجزیه شده برای اکسیدهای عناصر اصلی ۰/۰۱درصد و برای عناصر کمیاب ۰/۰۵ppm بوده است. تعداد ۱۰ نمونه نیز به وسیله دستگاه پراش پرتو ایکس در آزمایشگاه شرکت زرآزما و کانساران بینالود تجزیه شد. تجزیه گرمایی به وسیله دستگاه DTA/TGA مدل STA409 pc luxx ساخت شرکت NETZSCH آلمان در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران بر روی دو نمونه و به میزان ۱۰۰ گرم از هر نمونه در جو هوا با افزایش تدریجی دما از دمای ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد برای محیط تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با زمان ۱۰ درجه بر دقیقه انجام‌شد. برای بررسی شیمی نمونه‌های برداشت شده از ناحیه مورد بررسی، تعداد ۳۶ نقطه از نمونه‌ها در آزمایشگاه الکترون میکروپروب دانشگاه پوتسدام کشور آلمان مورد تجزیه مایکروپروب (نقطه‌ای) قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده جهت انجام تجزیه الکترون میکروپروب از نوع CAMECA-SX-100 ساخت کشور فرانسه با اندازه باریکه ۵ میکرون‌متر، جریان ۱۰ تا ۲۰ نانوآمپر (nA)، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوالکترون‌ولت (KeV) و زمان تجزیه ۱۵ تا ۲۵ ثانیه بوده است. استانداردهای مورد استفاده شامل کانی اسفالریت برای عنصر روی، کانی باریت برای عنصر باریم، کانی گالن برای عنصر سرب، کانی کالکوپیریت برای عنصر مس، کانی پریکلاز برای عنصر منیزیم، کانی اسپکیولاریت برای عنصر آهن، اکسید نیکل برای عنصر نیکل، کانی رودونیت برای منگنز، کانی سلستین برای استرانسیوم و کانی ولاستونیت برای عناصر سیلیسیم و کلسیم بوده است. نمونه‌های مورد استفاده شامل مقاطع نازک- صیقلی در لام استاندارد زمین‌شناسی ($46\times27mm^2$) بوده که برای جلوگیری از باردار شدن نمونه‌ها طی تابش با لایه نازک کربن به ضخامت ۱۰۰ میکرون پوشش داده شدند. در ابتدا شناسایی کیفی- کمی اولیه به وسیله طیف پراش انرژی پرتوی اشعه ایکس با زمان میانگین ۲۰ ثانیه تهیه شد. یک تصویر الکترونی ناشی از الکترون‌های برگشتی نیز به صورت هم‌زمان تهیه شد. خطای تجزیه برای عناصر اصلی ۱ درصد نسبی و برای عناصر فرعی ۵ درصد نسبی است.

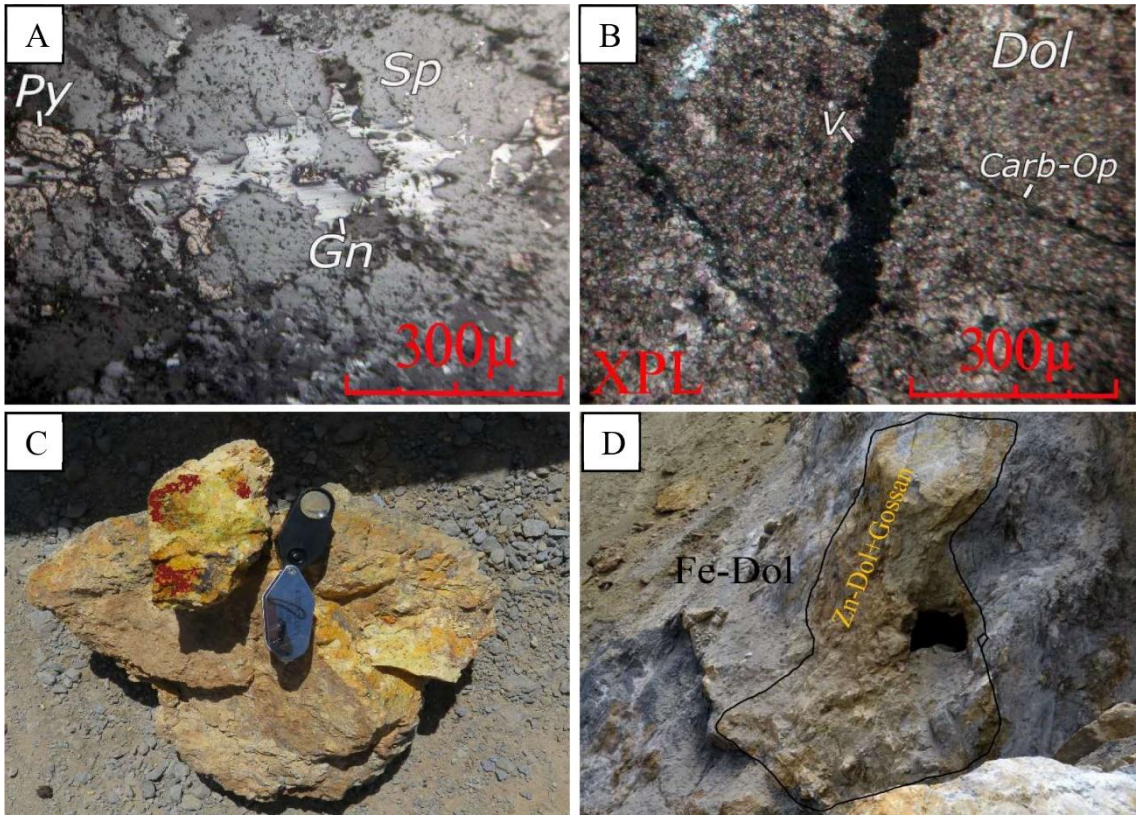
نتایج و بحث

کانی‌زایی و دگرسانی

در ناحیه مورد بررسی تنگ‌دزدان، طیف گسترده‌ای از کانه‌های روی و به مقدار کمتر سرب تشکیل شده‌اند که مهم‌ترین آنها در بخش برون‌زاد اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت و سروزیت و در بخش درون‌زاد اسفالریت و به میزان کمتر گالن و پیریت است (شکل ۳-A). کانی‌ها و سنگ‌های موجود در ناحیه کانه‌دار نیز شامل دولومیت، دولومیت تا آهک دولومیتی، دولومیت غنی از اسفالریت و آهک دولومیتی غنی از پیریت است (شکل ۳-B) (Amiri and Shahrokhi, 2023). مشاهدات صحرایی نشان‌دهنده گسترش پهنه‌های گوسان‌دار، سنگ گچ، باریت و رگچه‌هایی از جنس سیلیس و چرت در ناحیه است. شباهت فراوان کانه‌های غیرسولفیدی روی به کانی‌های کربناتی همانند کلسیت و دولومیت و گستردگی تنوع رنگی آنها موجب دشواری تفکیک آنها می‌شود. لذا برای شناسایی صحرایی کانه‌های غیرسولفیدی روی از معرف دو جزیی زینک‌زپ استفاده شد که به صورت کیفی با نشان‌دادن حضور کانی روی‌دار به رنگ قرمز و نارنجی منجر می‌شود (شکل ۳-C). بخش غیرسولفیدی ماده معدنی به

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

صورت چینه‌کران در واحد دولومیتی $K^{l,dl}$ تشکیل‌شده و بخش عمده سنگ کربناتی در بیشتر مناطق و به شکل گسترده به دولومیت تغییر یافته است و تحت‌تأثیر فرایند دولومیت‌زایی قرارگرفته است (شکل ۳-D). در ناحیه مورد بررسی بر اساس رنگ قابل مشاهده در صحرا، سه نوع دولومیت قابل تشخیص است. نوع اول دولومیت تیره رنگ است. نوع دوم به رنگ زرد تا قهوه‌ای است که می‌تواند به دلیل اکسایش برون‌زاد Fe^{2+} در شبکه دولومیت باشد (Motavali et al., 2019; Yang et al., 2019). کالامین نوع سفیدرنگ همراه با این دو نوع دولومیت دیده می‌شود. نوع سوم مایل به قرمز تا نارنجی و همراه با کالامین نوع قرمزرنگ بوده و ارتباط نزدیکی به نقاط کانی‌سازی دارد (شکل ۳-D).



شکل ۳. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از ناحیه تنگ دزدان. A: قطع‌شدگی کانه‌زایی توده‌ای اسفالریت توسط رگچه‌های پیریت و گالن (نور بازتابی)، B: حضور دولومیت همراه با رگچه‌های انحلالی (V) و رگچه‌های کربناتی دارای کانی‌های کدر، C: شناسایی صحرایی کانه‌های غیرسولفیدی روی با استفاده از معرف دو جزیی زینک‌زپ و D: تبدیل‌شدگی دولومیت اولیه به دولومیت آهن‌دار و حضور زینسین‌دولومیت در اطراف کانی‌سازی روی. علائم اختصاری از سیولا و اشمید (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس‌شده است (Gn: گالن، Sp: اسفالریت، Py: پیریت، Dol: دولومیت، Op: اوپک، Carb: کربنات).

Fig. 3. Field and microscope photographs of Tangedozdan area. A: Disruption of sphalerite masive mineralization by pyrite and galena veins (Reflected light), B: Presence of dolomite with dissolution veins (V) and carbonate veins with opaque minerals, C: Field identification of non-sulfide zinc ores using two-component zinc-zap reagent, and D: transformation of primary dolomite to iron-bearing dolomite and the presence of zincian-dolomite around Zn mineralization. Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (Gn: Galene, Sp: Sphalerite, Py: Pyrite, Dol: Dolomite, Op: Opac, Carb: Carbonate).

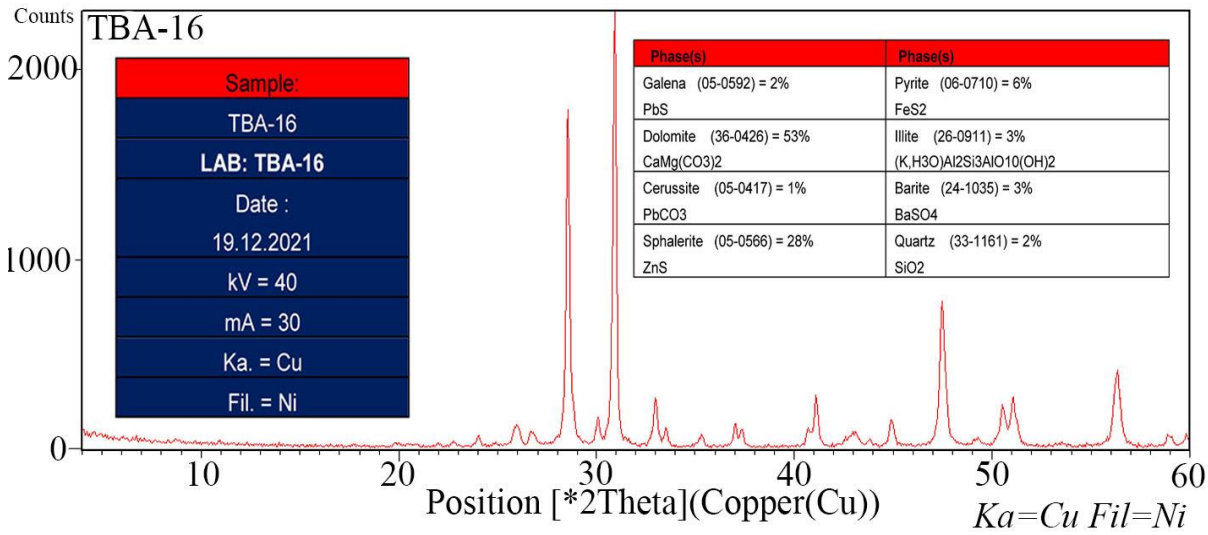
DOI: 10.22067/econg.2025.1132

تشکیل کانی‌های غیرسولفیدی روی، حاصل اکسایش برجای کانه‌های سولفیدی اولیه روی توسط آب‌های اسیدی فرورو در حال چرخش درون سنگ‌های کربناتی است (Boni and large, 2003). تشکیل هاله گسترده‌ای از زینسین‌دولومیت که به طور انتخابی جانشین دولومیت اولیه در طول مناطق گسلی و شکستگی‌ها می‌شود، اثر دیگری از دگرسانی برون‌زادی همراه با کانی‌های غیرسولفیدی است (Boni et al., 2011). مهم‌ترین اثر دگرسانی برون‌زاد همراه با کانی‌سازی غیرسولفیدی روی در منطقه، عبارت است از جانشینی انتخابی دولومیت‌های اولیه با دولومیت‌های فاز جدید روی‌دار در طول گسل‌ها، شکستگی‌ها، ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها. اندازه‌گیری این فرایند که در بیشتر مناطق معدنی مرتبط با فرایند برون‌زاد رخ‌داده است و به جانشینی منیزیم توسط روی در ساختار دولومیت منجر می‌شود، اغلب مشکل بوده و باید این پدیده را با استفاده از تصویرهای الکترونی و تجزیه جزئی در مقیاس میکرونی بررسی کرد. این نوع دولومیت روی‌دار در ناحیه تنگ‌دزدان با استفاده از روش‌های تجزیه‌ای مختلف از جمله پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی، گرماوزن‌سنجی- گرماسنجی تفاضلی و تجزیه الکترون میکروپروب شناسایی شده و مورد بررسی قرارگرفت.

تجزیه پراش پرتو ایکس

تعداد ۱۰ نمونه از دولومیت‌های برداشت شده از ناحیه مورد بررسی به روش XRD مورد تجزیه قرار گرفتند (شکل ۴ و جدول ۱). دولومیت استاندارد با کارت شماره ۰۴۲۶-۰۳۶-۰۰ و با کمک نرم‌افزار Xpert high scorplus بررسی و شناسایی‌شد. بر اساس این تجزیه‌ها، دولومیت، اسمیت‌زونیت، اسفالریت کانی اصلی، سروزیت، هماتیت، کوارتز، باریت، کلسیت، پیریت و گالن کانی فرعی و موسکیت، ایلیت نیز به عنوان کانی کمیاب قابل مشاهده است.

با توجه به وجود مقدار بیش از ۳ درصد روی در بعضی نمونه‌های دولومیت و نبود اختلاف قابل‌توجه در دولومیت‌ها با قله معمول ۳۶، برای بررسی دقیق‌تر، پس از تغییر شرایط تجزیه و تغییر زمان و زاویه قله و با توجه به نتایج تجزیه شیمیایی که وجود مقدار روی در دولومیت‌های قرمزرنگ همراه با کانی‌سازی روی و سرب را نشان می‌داد، تجزیه مجدد نمونه‌های با مقادیر بالای روی انجام‌شد.



شکل ٤. الگوی XRD مربوط به یکی از نمونه‌های تنگ‌دزدان

Fig. 4. The XRD pattern of one of Tangedozdan area samples

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

جدول ۱. کانی‌های موجود در نمونه‌های تنگ‌دزدان بر اساس تجزیه XRD. علائم اختصاری از سیولا و اشمید (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس‌شده است.

Table 1. Minerals in the Tangedozdan samples analyzed by XRD method. Abbreviations after Siivola and Schmid (2007).

Sample No.	Major	Minor	Trace
TD-01	Dol, Sm, Br	Cer, Hem, Cal	----
TD-02	Dol	Cer, Hem, Br, Sm	Cal, Qtz
TD-03	Dol, Sm	Cer, Hem, Br, Cal	Ms, Qtz
TD-04	Dol, Sm	Cer, Hem, Br	Cal, Qtz
TD-05	Dol, Sm,	Cer, Hem,Br	Cal
TBA-11	Dol, Sph, Cer	Gn, Qtz	Cal, Qtz, Br
TBA-15	Dol, Gn,Sph	Br, Qtz	Ms
TBA-14	Dol, Py, Gn, Qtz	Sph, Br	Ms, Ill
TBA-16	Gn, Dol, Cer, Sph	Br, Qtz	Py, Ill
TBA-19	Dol, Sm	Sph, Qtz, Hem	Br

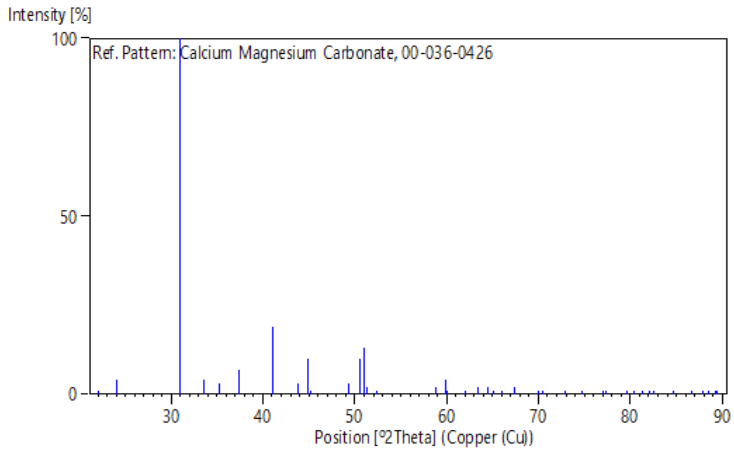
فاصله بین صفحه‌ای d برای دولومیت‌های با تنوع رنگی متفاوت ۲/۸۸ انگستروم است که تغییر محسوسی را در جهت بررسی زینسین‌دولومیت نشان نمی‌دهد. لذا تعداد ۵ نمونه با مقادیر متفاوت روی انتخاب شده و بر اساس روش Rietveld در نرم‌افزار Maud بررسی و مؤلفه‌های a و c شبکه محاسبه شد (Monecke et al., 2001). بر این اساس، مؤلفه‌های a و c شبکه در نمونه TBA-15 با مقدار روی ۰/۵۵ درصد به ترتیب a=4.7900Å و c=15.8111Å، در نمونه TBA-14 با مقدار روی ۲/۱۰ درصد به ترتیب a=4.8092Å و c=16.0200Å، برای نمونه TBA-16 با مقدار روی ۳/۰۵ درصد به ترتیب a=4.8130Å و c=16.0233Å، برای نمونه TBA-19 با مقدار روی ۳/۵۶ درصد به ترتیب a=4.8170Å و c=16.0310Å و برای نمونه TBA-11 با مقدار روی ۵ درصد به ترتیب a=4.8200Å و c=16.0388Å تعیین‌شده است (شکل ۵ و جدول ۲). مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش میزان روی در زینسین‌دولومیت‌ها مؤلفه‌های شبکه‌ای نیز افزایش می‌یابند؛ به طوری‌که این نسبت در دولومیت با ناخالصی روی ۰/۵ درصد دارای کمترین و در زینسین‌دولومیت‌ها بیشترین مقدار را داراست که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین میزان روی در شبکه دولومیت با مؤلفه‌های شبکه‌ای است.

همچنین بر اساس تجزیه XRD فرمول زیر به صورت میانگین برای دولومیت‌های ناحیه تنگ‌دزدان به دست آمده است که حضور روی را می‌توان به صورت جانشینی به جای منیزیم در نظر گرفت.

$Ca(Mg_{0.977}Fe_{0.011}Na_{0.005}Mn_{0.003}Ca_{0.004})(CO_3)_2$

با توجه نمونه‌های تجزیه شده به روش ICP-MS مقدار CaO=30.18، MgO=21.10، FeO=0.44، MnO=0.11، CO_2=47.18، Na_2O=0.17، Al_2O_3=0.13 و SiO_2=0.47 تعیین‌شده است.

DOI: 10.22067/econg.2025.1132



شکل ۵. الگوی XRD مربوط به یکی از نمونه‌های تنگ‌دزدان پس از تغییر مؤلفه‌های شبکه

Fig. 5. The XRD pattern of the Tangedozdan sample after changing the lattice parameters

جدول ۲. مؤلفه‌های شبکه‌ای دولومیت برای نمونه‌های تنگ‌دزدان

Table 2. Lattice parameters of dolomite for the Tangdedozdan samples

Sample No.	Zn (%)	Crystallographic parameters	
		a (Å)	c (Å)
TBA-15	0.55	4.7900	15.8111
TBA-14	2.10	4.8092	16.0200
TBA-16	3.05	4.8130	16.0233
TBA-19	3.56	4.8170	16.0310
TBA-11	5.00	4.8200	16.0388

گرماسنجی تفاضلی

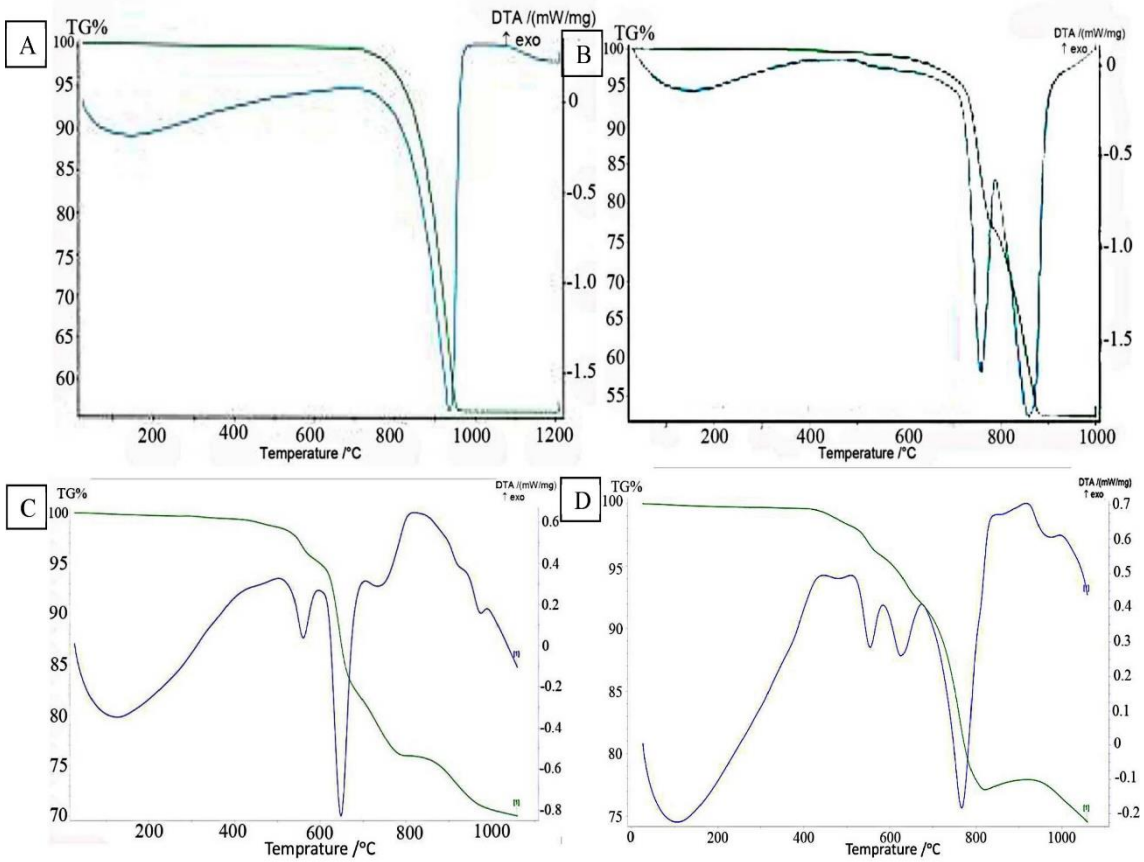
گرماسنجی تفاضلی یک روش سریع برای دستیابی بیشتر به اطلاعات کانی‌های کربناتی همانند ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی است (Zabinski, 1980; Yang et al., 2019). این روش می‌تواند دولومیت خالص را از زینسین‌دولومیت بر اساس نقطه گرمایی از نخستین گرمایش گرماگیر تفکیک کند (Yang et al., 2019; Zabinski, 1980).

نتایج مربوط به کلسیت خالص و دولومیت خالص (شکل ۶-A و B) با نتایج حاصل از گرماسنجی تفاضلی دو نمونه دولومیت TBA-14 و TBA-19 مربوط به ناحیه تنگ‌دزدان مقایسه‌شده است (شکل ۶-C و D). در این نمودارها، نقاط واکنشی گرماگیر دولومیت‌ها در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است. بررسی نتایج حاصل نشان‌دهنده حضور زینسین‌دولومیت در ناحیه تنگ‌دزدان بوده و بسیار شبیه مواردی است که در کانسارهای

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

مختلف جهان مورد بررسی قرارگرفته است (Boni and large, 2003; Fazli et al., 2018).

در تصویر DTA نمونه دولومیتی خالص، دو قله مهم واکنشی گرماگیر وجود دارد. قله اول در دمای ۷۸۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود که مربوط به نمونه دولومیت نسبتاً سالم و غیردگرسان بوده و بدون هر نوع کانی‌سازی از جمله روی و سرب است. در این نمونه نخستین نقطه واکنشی گرماگیر دولومیت مربوط به واپاشی لایه‌های دولومیتی وابسته به ساختار و گرمای موجوداست. این موارد متأثر از کاتیون‌های جانشین شده به جای عنصر منیزیم نیز است. به عنوان مثال، حضور مقادیر بالای آهن در آنکریت موجب کاهش نخستین نقطه واکنشی گرماگیر می‌شود (Kulp et al., 1951). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، نسبت Fe:Mg به مقدار ۵:۱ موجب کاهش نقطه گرماگیر به میزان ۴۰ درجه سانتی‌گراد و از ۸۰۰ به ۷۶۰ درجه سانتی گراد خواهد شد. با توجه به اینکه تأثیر جانشینی روی در ساختار دولومیت نسبت به آهن بیشتر است؛ بنابراین، اثر مقدار روی در نمونه‌های ناحیه تنگ‌دزدان به صورت واضح قابل مشاهده است.



شکل ٦. داده‌های مربوط به تجزیه TDA-TGA در ناحیه تنگ‌دزدان. A: منحنی گرماسنجی تفاضلی مربوط به کلسیت خالص، B: منحنی گرماسنجی تفاضلی مربوط به دولومیت خالص، C: منحنی گرماسنجی تفاضلی مربوط به نمونه TBA-14 و D: منحنی گرماسنجی تفاضلی مربوط به نمونه TBA-19

Fig. 6. A: Differential calorimetry curve for pure dolomite, B: Differential calorimetry curve for pure dolomite, C: Differential calorimetry curve for TBA-14 sample, and D: Differential calorimetry curve for TBA-19 sample

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، نمونه شماره TBA-14 با دارا بودن ۲/۱۰ درصد عنصر روی و قله گرماگیر در دمای تقریبی ۵۰۳ و ۵۹۵ درجه سانتی‌گراد عنصر روی داده و در شروع قله در دمای ۱۲۶ درجه سانتی‌گراد نیز یک کاهش جزئی در حدود ۱۵ درصد دیده می‌شود. در این نمونه، قله‌های واکنشی بعدی در ۷۰۵، ۸۱۹ و ۹۷۵ درجه سانتی‌گراد ظاهر شده است. همچنین در نمونه TBA-19 که بیشتر شامل زینسین‌دولومیت با دارا بودن ۳/۵۶ درصد عنصر روی است، در دمای ۴۴۷ و ۵۰۹ درجه سانتی‌گراد دو قله واکنشی و پس از آن دو قله واکنشی دیگر در ۵۸۴ و ۶۷۴ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. همچنین در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با کاهش قابل توجه روبرو بوده و با افزایش دما قله‌های واکنشی بعدی به ترتیب در دماهای ۸۳۴، ۹۱۷ و ۹۷۵ درجه سانتی‌گراد ظاهر شده است. بر این اساس، افزایش میزان روی در ساختار دولومیت موجب کاهش نقطه واکنشی به شکل منحنی غیرخطی می‌شود؛ در حالی‌که در نمونه‌های آهن‌دار همانند آنکریت، اغلب منحنی‌های واکنش خطی هستند (Kulp et al., 1951). دما و افزایش نقطه دوم قله واکنشی گرماگیر و واپاشی لایه‌های $CaCO_3$ ممکن است متأثر از مقدار عنصر روی نباشد؛ اما در نمونه‌های با مقدار سرب بیش از ۰/۵ppm اثر آن دیده می‌شود. در نمونه TBA-19 مقدار سرب ۱/۷۰ درصد و در نمونه TBA-14 مقدار سرب ۰/۹۲ درصد است و این مقدار باعث پایین‌آمدن قله واکنشی دوم به کمتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. به این ترتیب و بر اساس این آزمایش حضور روی در دولومیت‌ها و تشکیل زینسین‌دولومیت در ناحیه تنگ‌دزدان به خوبی قابل مشاهده است.

تجزیه الکترون مایکروپروپ

برای شناسایی دقیق کانی‌های مختلف، ترتیب تقدم و تأخر، چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر و سنگ میزبان و یا میان‌بارهای ریز در حد میکرون، می‌توان از نتایج EPMA شامل تصویرهای مختلف، نمودارها و داده‌های تجزیه‌ای به دست آمده، استفاده کرد (Gholizadeh et al., 2019). برای تعیین ترکیب، نوع و منشأ روی در ناحیه تنگ‌دزدان، سه نمونه از دولومیت‌های روی‌دار به طریقی انتخاب شدند که بر اساس تجزیه ICP-MS انجام‌شده بر روی نمونه‌ها، دولومیت نوع اول (TBA-15) دارای میزان روی ۰/۵ درصد، میزان آهن ۷۰۸۵۲ppm و میزان منگنز ۷۰۸ppm، نمونه دولومیت نوع دوم (TBA-14) دارای میزان روی ۲/۱۰ درصد، میزان آهن ۵۳۱۳۸ppm و میزان منگنز ۳۵۰ppm و در نمونه زینسین دولومیت نوع سوم (TBA-19) دارای میزان روی ۳/۵۶ درصد، میزان آهن بیش از ۱۰ درصد و میزان منگنز ۱۵ppm است. تجزیه زمین‌شیمی می‌تواند تجزیه دقیق و مفیدی جهت پردازش و بررسی اولیه نمونه و عیار عناصر ارائه‌دهد؛ اما قادر به نمایش حضور میان‌بارهای ریز بیگانه در زینسین‌دولومیت نیست. نتایج تجزیه شیمیایی سه نمونه انجام‌شده به روش الکترون میکروپروپ در جدول ۳ ارائه‌شده است. دولومیت‌ها از نظر ظاهری و همچنین از دیدگاه زمین‌شیمیایی به سه فاز مجزا تقسیم می‌شوند. دولومیت‌های اولیه از نظر عنصرسنجی دارای دو عنصر کلسیم و منیزیم و تقریباً بدون ناخالصی عنصر دیگر هستند. در تصویرهای الکترونی، شناسایی دولومیت‌های نوع اول و دوم با توجه به نزدیکی زیاد رنگ آنها بسیار دشوار است؛ اما نظر به اختلاف رنگ آنها در اطراف رگه و در ناحیه مورد بررسی، دولومیت‌های سیاه‌رنگ به عنوان نوع یک، دولومیت‌های زرد رنگ به عنوان نوع دو و دولومیت‌های نارنجی- قرمزرنگ به عنوان نوع سه (زینسین دولومیت) رده‌بندی شدند.

در نتایج حاصل از الکترون میکروپروپ نیز مقدار روی، معیار مهم تقسیم‌بندی بوده و تقریباً اختلاف آن در دولومیت‌های نارنجی- قرمز رنگ شامل زینسین‌دولومیت‌ها کاملاً دیده می‌شود؛ اما در نمونه TBA-19 که نمونه زینسین‌دولومیت است، علاوه بر کلسیت و دولومیت، میزان عنصر روی بالاتر از حد زمینه و نشان‌دهنده حضور روی در شبکه کانی دولومیت است.

بر اساس نتایج الکترون میکروپروپ از انواع دولومیت بیان‌شده، مقدار عنصر روی برای دولومیت‌های اولیه سیاه‌رنگ در نمونه TBA-15، زیر حد تشخیص دستگاه یعنی ۵۰۰ گرم در تن است و بنابراین میزان روی محاسبه‌شده برای این نمونه در تمامی موارد صفر شده است.

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

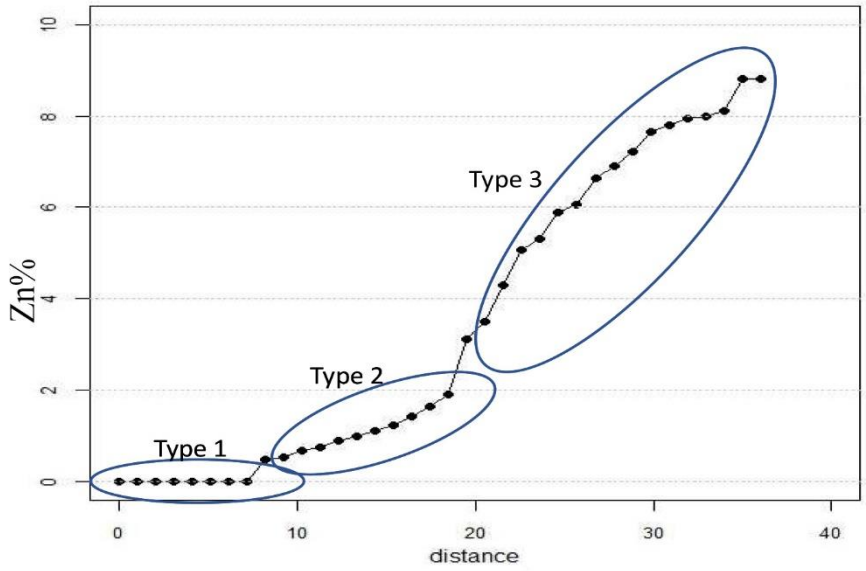
جدول ۳. نتایج تجزیه شیمیایی سه نمونه انجام‌شده به روش الکترون میکروپروپ از ناحیه تنگ‌دزدان

Table 3. Results of chemical analysis of three samples performed by EPMA method in the Tangedozdan area (T1=TBA15, T2=TBA14, T3=TBA19)

Point No.	Type	Zn	Pb	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Ba	Ni	Sr	Zn/Mg	Si	Total
1	T1	0	0	22.49	12.11	0.10	0	0.13	0.12	0.04	0	--	0.12	35.11
2	T1	0	0.41	21.67	12.73	0	0.35	0.10	0	0.07	0.03	--	0.02	35.38
3	T1	0	0	23.27	12.26	0	0.26	0.12	0.55	0	0.04	--	0.12	36.62
4	T1	0	0.29	22.99	13.07	0.04	0	0.11	0	0.10	0	--	0.03	36.63
5	T1	0	0	22.44	12.34	0	0.52	0.16	0.46	0	0.09	--	0.07	36.07
6	T1	0	0	21.06	13.50	0.24	0.05	0.25	0	0	0	--	0.08	35.18
7	T1	0	0.65	22.54	12.08	0.08	0.75	0.21	0	0	0	--	0.04	36.30
8	T1	0	0	21.07	13.49	0.22	0.66	0.18	0.22	0.11	0.12	--	0.02	36.74
9	T2	0.48	0.07	22.34	12.01	0	0.51	0.15	0	0	0.01	0.04	0.01	35.62
10	T2	0.52	0.25	20.05	13.01	0.59	0.79	0.12	0	0	0	0.04	0.03	35.36
11	T2	0.68	0	21.29	12.71	0.09	0.41	0.09	0.02	0	0	0.05	0.02	35.31
12	T2	0.75	0.12	21.10	12,70	0	1.13	0.07	0	0	0	0.06	0.02	35.89
13	T2	0.89	0.15	20.85	13.39	0.55	.0.95	0.11	0	0.08	0	0.06	0.03	37.00
14	T2	0.99	0.01	22.50	13.10	0	0.35	0.12	0.02	0	0.02	0.07	0.03	37.14
15	T2	1.10	0.41	21.30	12.50	0.09	1.14	0.15	0	0.12	0	0.07	0.06	36.87
16	T2	1.22	0.01	22.40	12.31	0	0.88	0.12	0	0	0	0.09	0.05	36.99
17	T2	1.42	0.22	21.12	12.70	0.12	0.66	0.07	0	0	0	0.10	0.03	36.26
18	T2	1.65	0.18	21.01	13.41	0	0.99	0.08	0	0.07	0	0.12	0.09	37.48
19	T2	1.90	0.13	22.22	12.11	0	1.21	0.06	0	0	0	0.16	0.04	37.67
20	T3	3.11	0.15	22.65	8.01	0.04	0.05	0	0	0	0.03	0.39	0	34.04
21	T3	3.51	0.55	22.01	8.51	0.01	0	0.02	0	0	0.01	0.41	0.1	34.72
22	T3	4.29	2.31	20.99	7.49	0.18	0.19	0	0.01	0	0	0.60	0.05	35.51
23	T3	5.08	0.20	22.35	8.92	0.01	0.21	0	0.01	0	0.01	0.60	0.15	36.94
24	T3	5.32	0.31	22.00	7.69	0.04	0.51	0	0	0.01	0.01	0.69	0.04	35.93
25	T3	5.89	2.39	19.65	7.95	0.07	0.49	0.10	0	0	0	0.74	0	36.54
26	T3	6.05	3.09	20.85	7.35	0.22	0.07	0.11	0	0	0	0.82	0.06	37.80
27	T3	6.65	2.71	20.01	7.81	0.01	0.09	0	0.01	0	0	0.85	0.01	37.30
28	T3	6.90	2.49	20.65	7.09	0.08	0.11	0	0	0	0.01	0.97	0.09	37.42
29	T3	7.22	2.21	20.06	7.48	0.04	0.12	0	0	0.01	0	0.96	0.07	37.21
30	T3	7.65	2.39	19.79	6.89	0.05	0.07	0	0.01	0	0.01	1.11	0.05	36.91
31	T3	7.80	2.15	20.85	6.36	0.01	0.08	0.10	0	0	0	1.23	0	37.25
32	T3	7.95	2.59	20.01	6.81	0.06	0.11	0	0	0	0.01	1.17	0.01	37.54
33	T3	7.99	2.61	20.60	7.08	0.16	0.09	0	0	0	0	1.13	0.1	39.59
34	T3	8.10	3.21	19.06	8.51	0.04	0.10	0	0.01	0	0	0.95	0.18	39.21
35	T3	8.80	3.51	19.55	8.11	0.08	0.13	0	0	0	0	1.08	0.11	39.74
36	T3	8.01	2.77	20.98	7.71	0.09	0..08	0	0	0	0	1.04	0.14	38.78
Mr*	-----	20.23	0	12.32	7.54	0.41	2.07	0	0	0	0	---	0.19	42.76
D.L.	-----	450	220	289	310	250	250	170	340	300	270	---	340	------

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

در نمونه TBA-14 شامل دولومیت‌های زردرنگ نوع دو (آهن‌دار) از ۰/۴۸ تا ۱/۹۰ گرم در تن و در نمونه TBA-19 شامل دولومیت‌های نارنجی- قرمزرنگ نوع سه (زینسین دولومیت) از ۳/۱۱ گرم در تن شروع شده و به بیش از ۸ گرم در تن می‌رسد. بر این اساس، در نمودار تهیه شده، سه نوع دولومیت مشخص شده‌اند که بیشترین مقدار مربوط به زینسین‌دولومیت‌ها و کمترین مقدار مربوط به دولومیت‌های سیاه‌رنگ اولیه است (شکل ۷). در نمونه TBA-16 نسبت Zn:Mg از ۰/۴ تا ۰/۱۶ است؛ در حالی که در نمونه زینسین‌دولومیت TBA-19 این مقدار از ۰/۳۹ تا ۱/۰۴ متغیر است. در چند نمونه نیز مقدار روی بیشتر از منیزیم است. در اینجا برخلاف تجزیه‌های زمین‌شیمی همانند ICP-MS حضور میان‌بارهای ریز کانی‌هایی همچون اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت نمی‌تواند موجب افزایش قله روی و بالارفتن آلودگی شود. با توجه به اینکه هر فاز یا کانی به صورت مستقل مورد تجزیه قرار می‌گیرد، بنابراین نتایج الکترون میکروپروب به صورت واضح منعکس‌کننده ترکیب شیمیایی انواع کانی‌های کربناتی به خصوص انواع دولومیت است.

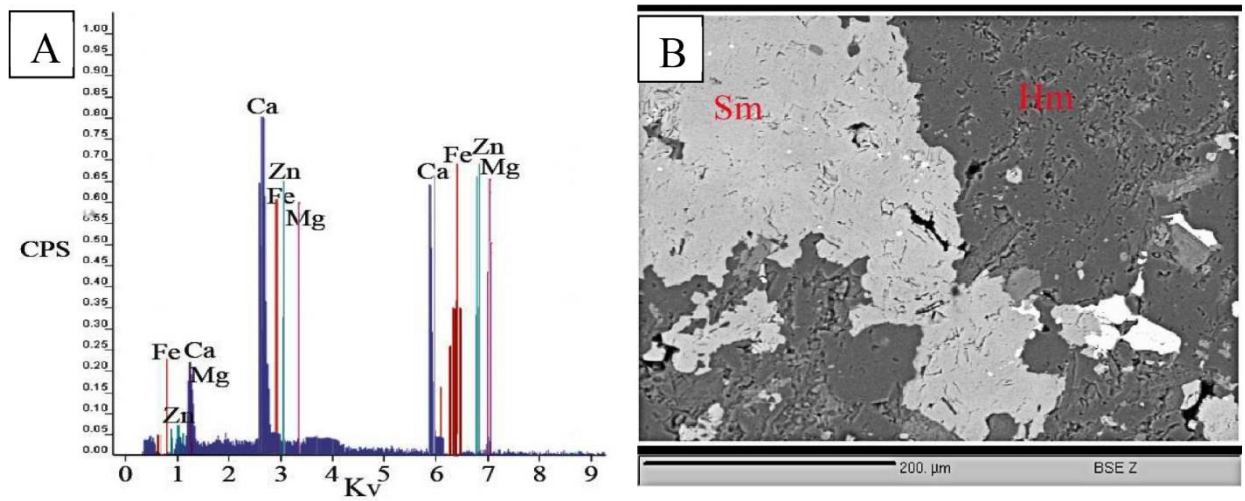


شکل ۷. نمودار حاصل از نتایج تجزیه نقطه‌ای و تفکیک سه نوع دولومیت به کمک عیار عنصر روی در ناحیه تنگ‌دزدان

Fig. 7. The diagram for the results of point analysis and separation of three types of dolomites with the help of zinc assay in the Tangedozdan area

با توجه به تصویرهای الکترون میکروپروپ، دولومیت‌های اولیه نوع یک اغلب در مرزهای بلوری و یا درز و شکاف‌ها به شکل موضعی، به وسیله دولومیت‌های آهن‌دار نوع دو جایگزین شده‌اند. تشکیل دولومیت‌های نوع اول و دوم متأثر از محلول‌های گرمابی است. در تصویرهای الکترونی، اکسایش و دولومیت‌زدایی دولومیت‌های اولیه با تشکیل کلسیت رگه‌ای و و اکسیدهای آهن و منگنز به خوبی قابل رؤیت است (شکل ۸-A و B). اکسید-هیدروکسیدهای آهن‌دار و کلسیت دارای مقادیری از عناصر روی و سرب هستند که در کلسیت رگه‌ای، میزان روی تا ۰/۵ درصد و سرب تا ۳ درصد وجود دارد. اکسید و هیدروکسیدها نیز دارای مقادیر اندکی از روی، سرب و سایر عناصر بوده؛ اما از آهن بالایی برخوردارند.

DOI: 10.22067/econg.2025.1132



شکل ۸. A: طیف EDS مربوط به یک نمونه کانی دولومیت روی‌دار در ناحیه تنگ‌دزدان و B: تصویر میکروسکوپ الکترونی کانی‌های همی‌مورفیت (Hm) و اسمیت‌زونیت (Sm) (Mandarino and Back, 2004) در ناحیه تنگ‌دزدان. علائم اختصاری از سیولا و اشمید (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس‌شده است (Hm: همی‌مورفیت، Sm: اسمیت‌زونیت).

Fig. 8. A: EDS spectrum of a dolomite mineral sample in the Tangedozdan area, and B: Electron microscope image of hemimorphite (Hm) and smithsonite (Sm) minerals (Mandarino and Back, 2004) in the Tangedozdan area. Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (Hm: Hemimorphite, Sm:Smithsonite).

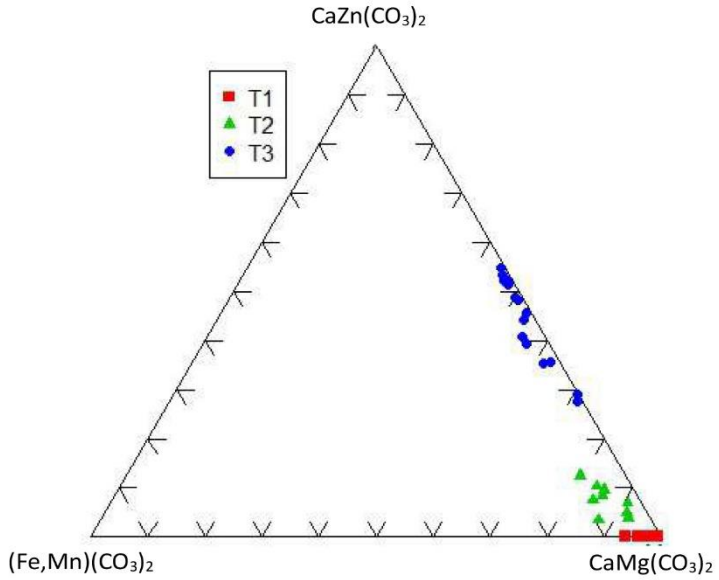
زینسین‌دولومیت‌ها به صورت ویژه غنی از عنصر روی به میزان ۳ تا ۹ درصد، مقدار سرب تا ۳/۶۱ درصد و مقدار آهن بسیار کم هستند. در این دولومیت‌ها عنصر روی جانشین منیزیم شده و می‌تواند تا جانشینی کامل عنصر روی به جای عنصر منیزیم ادامه یابد و هنگامی که این جانشینی به طور کامل انجام‌شود و به ۱۷ تا ۲۲ درصد وزنی یعنی تقریباً ۷۰ درصد مول برسد، کانی کربناتی مینرکوردیت تشکیل می‌شود. پس از این مرحله شبکه دولومیت ناپایدار شده و اسمیت‌زونیت رسوب می‌کند. به احتمال زیاد به هنگام تشکیل اسمیت‌زونیت مقداری عنصر منیزیم می‌تواند در شبکه این کانی جای بگیرد (Birch, 2007).

چنان‌که در تصویر BSE مشخص است، آثاری از اسمیت‌زونیت، هماتیت، کلسیت و دولومیت اولیه در نمونه TBA-19 قابل مشاهده است. داده‌های مربوط به تجزیه الکترون میکروپروپ نشان می‌دهد که میزان مس، نیکل، استرانسیوم، باریم و سیلیسیم در نمونه‌ها تغییر چندانی ندارد. مقادیری از عناصر سرب و آهن در شبکه TBA-19 قابل مشاهده است. مقادیر منیزیم، کلسیم، آهن و منگنز با افزایش مقدار روی کاهش می‌یابد. نتایج تجزیه شیمیایی به روش الکترون میکروپروپ به کمک نمودار مثلثی $CaZn(CO_3)_2$، $CaMg(CO_3)_2$، $Ca(Fe,Mn)(CO_3)_2$ مورد بررسی قرارگرفت (Boni et al., 2011). در این نمودار میزان افزایش و یا کاهش مربوط به هر سه نوع دولومیت نمایان است (شکل ۹).

نمونه‌های با منیزیم بالا در بخش منیزیم‌دار و نمونه‌های با روی بالا در قسمت روی‌دار ($CaZn(CO_3)_2$) متمرکز شده‌اند. وجود اختلاف شیمیایی بین دو قسمت می‌تواند به دلیل حضور مینرکوردیت در بین نمونه‌ها باشد که با توجه به اصل گلدشمیت (Goldsmith et al., 1962)، ناپایداری در دولومیت‌ها با توجه به افزایش مقدار عناصر به صورت زیر کاهش می‌یابد (Goldsmith et al., 1962; Goldsmith and Northrup, 1965; Rosenberg, 1967).

$$Mg>>Mn>Zn>Fe>Co>Ni>>Cu$$

DOI: 10.22067/econg.2025.1132



شکل ۹. ترکیب‌های مختلف دولومیتی در ناحیه تنگ‌دزدان در نمودار مثلثی $CaZn(CO_3)_2$، $CaMg(CO_3)_2$ ، $Ca(Fe,Mn)(CO_3)_2$ (Boni et al., 2011)

Fig. 9. Different compositions of dolomite of Tangedozdan area in the triangular diagram of $CaZn(CO_3)_2$, $CaMg(CO_3)_2$, $Ca(Fe,Mn)(CO_3)_2$. (Boni et al., 2011)

بر این اســاس، کاهش مقادیر عناصــری مانند منیزیم و یا افزایش عناصــر دیگری همانند منگنز، روی، آهن و کبالت به افزایش ناپایداری منجر می‌شود. به کمک این سری عنصری می‌توان گفت که دولومیت‌های با مقادیر بالای آهن ناپایداری بیشتری نسبت به دولومیت‌های با مقادیر بالاتر منیزیم دارند و در اثر اکســایش و آبدهی، عنصر آهن موجود در شبکه دولومیت، زودتر از عناصر دیگر همانند منیزیم و کلسیم خارج شده و به فرایند دولومیت‌زدایی منجر می‌شود. بر این اساس، دولومیت‌های آهن‌دار نقش مهم‌تری در تشکیل زینسین‌دولومیت‌ها ایفا می‌کنند. در جدول ۳، عناصر دیگری نیز همانند استرانسیوم، باریم و سیلیسیم نیز گزارش شده‌اند که گاهی میزان عیار استرانسیوم کمتر از حد تشخیص دستگاه بوده و فقط در مواردی در دولومیت‌های نوع یک مقدار آنها، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ گزارش‌شده است. غالب سنگ‌های آراگونیتی قدیمی در طی فرایند میان‌زایی مانند تبدیل آراگونیت به کلسیت، انحلال یافته و با قرارگرفتن در سامانه باز میان‌زایی استرانسیوم خود را از دست می‌دهند (Vandeginste et al., 2013). مقدار استرانسیوم در کربنات‌های حاره‌ای عهد حاضر، ۸۰۰۰mg/kg تا ۱۰۰۰۰mg/kg (Milliman, 1974) و در کربنات‌های معتدله بین ۱۶۰۰mg/kg تا ۵۰۰۰mg/kg (Rao and Amini, 1995; Rao and Adabi, 1992) است. بر این اساس، میران استرانسیوم در کربنات‌های ناحیه تنگ‌دزدان پایین بوده که نتیجه تأثیر محلول‌های گرمابی است. عنصر سیلیسیم در تمامی دولومیت‌ها به خصوص زینسین‌دولومیت‌ها حضور داشته و مقدار آن به ۰/۱۹ درصد نیز می‌رسد. عنصر باریم در زینسین‌دولومیت‌ها دیده شده؛ اما در سایر نمونه‌ها دولومیت‌ها یا مقدار کمی دارد و یا در زیر حد تشخیص قرارگرفته است.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، زینسین‌دولومیت در بخش کربناتی و همراه با کانی‌سازی غیرسولفیدی روی و سرب ناحیه تنگ‌دزدان

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

قابل تشخیص است. بر اساس این بررسی‌ها و با توجه به شواهد موجود رخداد زینسین‌دولومیت در پهنه اکسایشی نشان‌دهنده خاستگاه اپی‌زنتیک آن است. دمای تشکیل زینسین‌دولومیت وابسته به دمای سیال جوی است و طی فرایند هوازدگی به هنگام اکسایش کانی‌های سولفیدی تشکیل می‌شود. زینسین‌دولومیت طی یک فرایندهای پیچیده جانشین فازهای دولومیتی می‌شود.

زینسین‌دولومیت با حضور مقداری از عنصر روی و مقادیر کمتری از سرب، آهن و کادمیوم در شبکه آن مشخص می‌شود. البته مقدار عناصر آهن و منگنز نسبت به دولومیت با مقادیر کمتر عنصر روی کمتر شده؛ اما مقدار مس تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. فرایند تشکیل زینسین‌دولومیت یک فرایند چندمرحله‌ای جانشینی در دولومیت‌هاست که شامل دولومیت‌زدایی، تشکیل کلسیت و اکسیدهای آهن- منگنز است که نتیجه آن جانشینی کامل دولومیت توسط اسمیت‌زونیت است.

گسترش زینسین‌دولومیت و جانشینی آن در سنگ میزبان، تأثیر قابل‌توجهی در اکتشاف کانی‌های غیرسولفیدی روی دارد. باید توجه داشت که مقادیر عنصر روی در زینسین‌دولومیت همراه با مقدار روی در کانی‌های غیرسولفیدی همانند همی‌مورفیت و اسمیت‌زونیت محاسبه می‌شود که البته این مقدار غیر قابل فراوری است و ممکن است موجب محاسبه غیرعادی عیار حد نهایی شود. این امر باید در اکتشاف کانسارهای روی غیرسولفیدی مورد توجه قرار گیرد تا به اشتباه در ارزیابی و برآورد عیار کانسار منجر نشود. از طرف دیگر، حضور زینسین‌دولومیت می‌تواند به عنوان یک کلید اکتشافی مهم محسوب شود. بنابر این ابتدا لازم است وجود زینسین‌دولومیت‌ها در کانسارهای غیرسولفیدی روی مورد بررسی قرار گیرد و سپس میزان گستردگی، نحوه ارتباط کانی‌سازی روی و نقش آنها در تعیین عیار واقعی کانسارهای مشخص‌شود.

نتیجه‌گیری

زینسین‌دولومیت برون‌زاد در تمامی بخش‌های معدن تنگ‌دزدان حضور دارد؛ ولی اغلب بیشترین پراکندگی را همراه با دولومیت‌های قرمز تا نارنجی فاز ۳ نشان می‌دهد. این نوع دولومیت در بخش‌های مختلف در کنار ماده معدنی و در سینه‌کارهای استخراجی قابل مشاهده بوده و احتمال حضور آن در عمق‌های بیشتر نیز همراه با کانی‌سازی دور از انتظار نیست. با توجه به شواهد موجود، رخداد زینسین‌دولومیت در پهنه اکسایشی، نشان‌دهنده خاستگاه برون‌زادی آن است. همچنین دمای تشکیل زینسین‌دولومیت اغلب وابسته به دمای سیالات جوی طی فرایند هوازدگی هنگام اکسایش کانه‌های سولفیدی است. زینسین‌دولومیت طی فرایندی پیچیده، جانشین فازهای دولومیت پیشین می‌شود. در واقع جانشینی عنصر منیزیم با روی در دولومیت‌ها موجب تشکیل زینسین‌دولومیت می‌شود. این امر می‌تواند تا جانشینی کامل عنصر روی به جای عنصر منیزیم ادامه یابد و هنگامی که این جانشینی به طور کامل انجام‌شود، کانی کربناتی مینرکوردیت تشکیل می‌شود. پس از این مرحله شبکه دولومیت ناپایدار شده و اسمیت‌زونیت رسوب می‌کند. به احتمال زیاد به هنگام تشکیل اسمیت‌زونیت مقداری عنصر منیزیم می‌تواند در شبکه این کانی جای بگیرد. بر اساس داده‌های به دست آمده از تجزیه پراش پرتو ایکس، با افزایش میزان روی در زینسین‌دولومیت‌ها مؤلفه‌های شبکه‌ای نیز افزایش می‌یابند؛ به طوری‌که این نسبت در دولومیت با ناخالصی روی ۰/۵درصد دارای کمترین و در زینسین‌دولومیت‌ها بیشترین مقدار را داراست که بر اساس آن رابطه مستقیم بین میزان روی در شبکه دولومیت با مؤلفه‌های شبکه‌ای قابل اثبات است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده به روش دماسنجی تفاضلی، افزایش میزان روی در ساختار دولومیت موجب کاهش نقطه واکنشی به شکل منحنی غیرخطی می‌شود؛ در حالی‌که در نمونه‌های آهن‌دار همانند آنکریت، اغلب منحنی‌های واکنش، خطی هستند. بر این اساس، بررسی نمونه زینسین‌دولومیت نشان‌دهنده کاهش نقطه گرماگیر و تأثیر جانشینی روی در ساختار دولومیت است. از دیدگاه زمین‌شیمیایی، جایگزینی زینسین‌دولومیت با حضور مقادیری از عنصر روی و مقدار کمی سرب، آهن و کادمیوم در شبکه آن

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

مشخص می‌شود. انجام آزمایش‌های متفاوت در ناحیه تنگ‌دزدان، نشان‌دهنده حضور روی در شبکه دولومیت و تشکیل زینسین‌دولومیت است. همچنین میزان مس، نیکل، استرانسیوم، باریم و سیلیسیم در نمونه‌ها تغییر چندانی ندارد. مقادیری از عناصر سرب و آهن در شبکه دولومیت قابل مشاهده بوده و مقادیر منیزیم، کلسیم، آهن و منگنز با افزایش مقدار روی کاهش می‌یابند. به این ترتیب، فرایند تشکیل زینسین‌دولومیت در ناحیه تنگ‌دزدان به عنوان یک فرایند چند مرحله‌ای جانشینی در دولومیت‌ها قابل تفسیر است که با دولومیت‌زدایی و تشکیل کلسیت و اکسیدهای آهن منگنز آغاز شده و در نهایت به جانشینی کامل دولومیت و تشکیل اسمیت‌زونیت منجر شده است. در بعضی از نمونه‌ها آثاری از دولومیت اولیه، کلسیت و اسمیت‌زوینت وجود دارد. همچنین، افزایش منیزیم و کاهش منگنز، روی، آهن و کبالت به کاهش ناپایداری منجر می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، دولومیت‌های با آهن بالا نسبت به دولومیت‌های با منیزیم بالا ناپایدارتر بوده و دارای نقش مهم‌تری در تشکیل زینسین‌دولومیت‌ها هستند و بیانگر آن است که در اثر اکسایش و آبدهی، عنصر آهن موجود در شبکه دولومیت زودتر از عناصر دیگر همانند منیزیم و کلسیم خارج شده و به فرایند دولومیت‌زدایی منجر می‌شود. در موارد بیان‌شده، بررسی گسترش زینسین‌دولومیت و جانشینی آن در سنگ میزبان، اهمیت بسیاری در اکتشاف کانی‌های غیرسولفیدی روی داشته و می‌تواند به عنوان کلیدی مهم در اکتشاف کانسارهای روی مورد توجه قرار گیرد. در واقع مقدار عنصر روی در زینسین‌دولومیت، همراه با مقدار روی در کانی‌های غیرسولفیدی همانند همی‌مورفیت و اسمیت‌زونیت محاسبه می‌شود. البته در محاسبات میزان عیار روی، ممکن است مقدار عیار روی در زینسین‌دولومیت همراه با مقدار روی در کانی‌های غیر سولفیدی محاسبه شود که با توجه به غیر قابل فرآوری بودن این مقدار روی، می‌تواند موجب محاسبه غیرعادی عیار روی شود که باید با توجه به آن، از برآورد اشتباه در محاسبه عیار معدن جلوگیری شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیان‌نشده است.

1. XRD: X-ray diffraction
2. EPMA: Electron probe micro-analyzer
3. EDS: Energy-dispersive X-ray spectroscopy
4. BSE: Back-scattered Electron Detector
5. ICP-MS: Inductively coupled plasma mass spectrometry
6. DTA-TGA: Differential Thermal Analysis-Thermal Gravimetric Analysis

DOI: 10.22067/econg.2025.1132

References

Adelpour, M. and Rostamipaydar, G., 2018. The Study of alteration, mineralization, and fluid inclusion in the Howz-e-Sefid zinc-lead deposit (Central Iran). Iranian Journal of Geology, 47(12): 19–36. (in Persian with English abstract) Retrieved January 16, 2025 from http://geology.saminatech.ir/en/Article/9609

Amiri, B. and Shahrokhi, S.V., 2017. Geochemistry and Mineralogy of Zn &Pb in Tang-e-Dozdan area (NE Feraydoonshahr-Isfahan Province). 29th Symposium of Minerallography and Mineralogy of Iran, Damghan University, Damghan, Iran.

Amiri, B. and Shahrokhi, S.V., 2023. Ore control factors of Zinc and Lead mineralization in the Tangedozdan area (NE Fereydounshahr-Isfahan Province). Journal of Economic Geology, 15(1): 27–31. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.2023.79745.1058

Birch, W.D., 2007. Zincian dolomite from Broken Hill, New South Wales. Journal of the Geological Society of Australia, 30(1–2): 85–87. https://doi.org/10.1080/00167618308729238

Boni, M. and Large, D., 2003. Nonsulfide zinc mineralization in Europe: an overview. Economic Geology, 98(4): 715–729. http://dx.doi.org/10.2113/98.4.715

Boni, M. and Mondillo, N., 2015. The "calamine" and the "others": the great family of supergene nonsulfide zinc ores. Ore Geology Reviews, 67: 208–233. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.025

Boni, M., Mondillo, N. and Balassone, G., 2011. Zincian dolomite: apeculiar de dolomitization case?. Geology, 39(2): 183–186. https://doi.org/10.1130/G31486.1

Boveiri Konari, M. and Rastad E., 2017. Nature and origin of dolomitization associated with sulphide mineralization: new insights from the Tappehsorkh Zn-Pb (-Ag-Ba) deposit, Irankuh Mining District, Iran. Geological Journal, 53(1): 1–23. https://doi.org/10.1002/gj.2875

Boveiri Konari, M., Rastad E., Mohajjel M., Nakini A. and Haghdoost M., 2016. Structure, Texture, Mineralogy and Genesis of Sulphide Ore Facies in Tappeh Sorkh Detrital-Carbonate-Hosted Zn-Pb-(Ag) Deposit, South of Esfahan. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 25(97): 221–236. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41507

Choulet, F., Charles, N., Barbanson, L., Branquet, Y., Sizaret, S., Ennaciri, A., Badra, L. and Chen, Y., 2014. Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: Multi-scale characterization and origin. Ore Geology Reviews, 56: 115–140. http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.015

Delavar, S.T., Rasa, I., Lotfi, M., Borg, G., Rashidnejad Omran, N. and Afzal., P., 2014. Geological evidence and ore body facies of Tangedezdan Zn-Pb (Ag) deposit in Jurassic-Cretaceous carbonate sequence, Booeen Miandasht (Isfahan-Iran). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 23(91): 77–88. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43777

Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. Journal of Asian Earth Sciences, 37(2): 235–249. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.007

Fazli, S., Taghipour, B. and Lentz, D., 2018. The Zn-Pb sulfide and Pb-Zn-Ag non-sulfide Kuh-e-Surmeh ore deposit, Zagros Belt, Iran: Geologic, mineralogical, geochemical, and S isotopic constraints. Journal of Geochemical Exploration, 194: 146–166. http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.019

Gholizadeh, K., Rasa, I., Yazdi, M. and Boni, M., 2019. Mineralogy and geochemistry of Zincian-dolomite in Bahramtaj deposit, Yazd, Central Iran. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 27(4): 925–940. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.27.4.925

Gholizadeh, K., Rasa, I., Yazdi, M. and Boni, M., 2021. Geological structures and their role in control of mineralization in Bahramtaj Lead and Zinc deposit, Yazd province, Central Iran. Researches in Earth Sciences, 12(2): 206–225. https://doi.org/10.52547/esrj.12.2.206

Goldsmith, R., Graf, D.L. and Northrup D.A., 1962. Studies in the system $CaCO_3$, -$MgC0_3$- $FeCO_3$: (1) phase relations; (2) a method for major element spectrochemical analyses; (3) compositions of some ferroan dolomites. The Journal of Geology, 70(6): 659–688.

https://doi.org/10.1086/626865

Goldsmith, R. and Northrup, D.A., 1965. Subsolidus Phase relations in the systems $CaCO_3$, -$MgCO_3$, -$CoCO_3$ and $CaC0_3$-M&O,-$NiC0_3$. Journal Geology, The Journal of Geology, 73(6): 817–829. https://doi.org/10.1086/627122

Heyl, A.V. and Boizon, C.N., 1962. Oxidized zinc deposits of the United States, part 1. General geology, U.S. Geology Survey, 1135-A, 52 pp. Retrieved January 16, 2025 from https://pubs.usgs.gov/bul/1135a/report.pdf

Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D.F., Allen, C.R. and Carman C.E., 2003. Classification, genesis, and exploration guides for Nonsulfide Zinc deposits. Economic Geology, 98(4): 685–714. http://dx.doi.org/10.2113/98.4.685

Jazi, M.A., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Crystallography, mineralogy and geochemistry of galena in Nakhlak lead mine (Esfahan). Iran Journal of Crystallography and Mineralogy, 24(1): 3–18. (in Persian with English abstract) Retrieved January 16, 2025 from http://dorl.net/dor/20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3

Karimpour, M.H., MalekzadehShafaroudi, A., Alaminia, Z., EsmaeiliSevieri A. and Stern C.R., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh-Ahangaran belt. Journal of Economic Geology, 10(2): 677–706. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v10i2.76528

Karimpour, M.H., MalekzadehShafaroudi, A., EsmaeiliSevieri, A., Shabani, S., Allaz, J.M. and Stern, C.R., 2017. Geology, mineralization, mineral chemistry, and ore fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. Journal of Economic Geology, 9(2): 267–294. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.64930

Kulp, J.L., Kent, P. and Kerr, P.F., 1951. Thermal study of the Ca-Mg-Fe carbonate minerals. American Mineralogist, 36(9–10): 643–670. Retrieved January 16, 2025 from https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109863578

Luke, G., Nigel, J., Cook, C., Ciobanu, L. and Benjamin, P.W., 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. American Mineralogist, 100(2–3): 548–569. http://dx.doi.org/10.2138/am-2015-4862

Mandarino, J.A. and Back, M.E., 2004. Fleischer's Glossary of Mineral Species 2004. The Canadian Mineralogist, 43(4): 1436-1437. http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.43.4.1436

Milliman, J.D., 1974. Marine Carbonates Part 1: Recent Sedimentary Carbonate. Springer-Verlag, Berlin, 375 pp.

Mondillo, N., Boni, M., Balassone, G. and Grist, B., 2011. In search of the lost zinc: a lesson from the Jabali (Yemen) nonsulfide zinc deposit. Journal of Geochemical Exploration, 108(3): 209-219. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.02.010

Mondillo, N., Boni, M., Balassone, G. and Villa, I., 2014. The Yanque Prospect (Peru): From Polymetallic Zn-Pb Mineralization to a Nonsulfide Deposit. Economic Geology, 109(6): 17351763. https://doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1735

Mondillo, N., Wilkinson, J., Boni, M., Weiss, D. and Mathur, M., 2018. A global assessment of Zn isotope fractionation in secondary Zn minerals from sulfide and non-sulfide ore deposits and model for fractionation control. Chemical Geology, 500: 182–193. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.09.033

Monecke, T., Kohler, S., Kleeberg, R., Herzing, P.K. and Gemmell, J.B., 2001. Quantitative phase-analysis by the Rietveld method using X-ray powder-diffraction data: Application to the study of alteration halos associated with volcanic-rock-hosted massive sulfide deposits. The Canadian Mineralogist, 39(6): 1617–1633. http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.39.6.1617

Motavali, K., Behzadi, M. and Yazdi, M., 2019. Geochemical evolution in Nodusahn Zn-Pb hydrothermal deposit with an emphasis on ore mineralography and sulfide analysis. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 27(1): 95–108. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.27.1.95

Newton, T., 2013. Geochemistry of the Timberville Zn-Pb District, Rockingham County. VA. Ph.D. thesis, University of Maryland, Maryland, USA, 137 pp.

Paradis, S., Keevil, H., Simandl, G. and Raudsepp, M., 2015. Carbonate-hosted non sulphide Zn-Pb

Mineralization of southern British Columbia, Canada. Mineralium Deposita, 50(8): 923–951. http://dx.doi.org/10.1007/s00126-014-0565-9

Peernajmodin, H., Rastad, E. and Rajabi, A., 2018. Ore structural, textural, mineralogical and fluid inclusions studies of the Kouh-Kolangeh Zn-Pb-Ba deposit, Malayer- Isfahan metallogenic belt, South Arak, Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 27(107): 287–303. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22071/gsj.2018.63856

Rao, C.P. and Adabi, M.H., 1992. Carbonate minerals, major and minor elements and oxygen and carbon isotopes and their variation with water depth in cool, temperate carbonates, western Tasmania, Australia. Marine Geology, 103(1–3): 249–272. https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90019-E

Rao, C.P. and Amini, Z.Z., 1995. Faunal relationship to grain-size, mineralogy and geochemistry in recent temperate shelf carbonate, Western Tasmania, Australia. Carbonates and Evaporites, 10: 114–123. https://doi.org/10.1007/BF03175247

Reichert, J. and Borg, G., 2008. Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted nonsulphide zinc deposits. Ore Geology Reviews, 33(2): 117–133. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.02.006

Rosenberg, E., 1967. Subsolidus relations in the system $CaCO_a$-$MgCO_a$-$FeCO_3$, between 350 and 550°C. American Mineralogist, 52: 787–796. Retrieved January 16, 2025 from http://www.minsocam.org/ammin/AM52/AM52_787.pdf

Siivola, J. and Schmid, R., 2007. List of Mineral Abbreviations: Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07. (Electronic Source). Retrieved January 16, 2025 from https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/662_19MemExPl_373_Las_Acacias/Documento/pdf/Anexo1_InveRecoBibl/Siivola%20y%20Schmid%20(2007).%20List%20of%20mineral%20abbreviations.pdf

Slezak, P.R., Olivo, G.R., Oliveira, G.D. and Dardenne, M.A., 2014. Geology, mineralogy, and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil. Ore Geology Reviews, 56: 234–257. http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.014

Soheili, M., Jafarian, M.B. and Abdollahi, M.R., 1992. Geological map of Aligudarz Scale 1:100000. Geological Society of Iran.

Thiele, O., Alavi, M. and Assefi, R., 1967. Geological map of Golpaygan Scale 1:250000. Geological Society of Iran.

Vandeginste, V., John, C.M. and Manning, Ch., 2013. Interplay between depositional facies, diagenesis and early fracture in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman. Marine and Petroleum Geology, 43: 489–503. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.11.006

Vaziri, S.H., Fursich, F.T. and Kohansalghadimvand, N., 2012. Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 29(2): 384–397. Retrieved January 16, 2025 from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742012000200007

Yang, Q., Liu, W., Zhang, J., Wang, J. and Zhang, X., 2019. Formation of Pb Zn deposits in the SichuanYunnan Guizhou triangle linked to the Youjiang foreland basin: Evidence from Rb Sr age and in situsulfur isotope analysis of the Mapping Pb Zn deposit in northeastern Yunnan Province, Southeast China. Ore Geology Reviews, 107: 780–800. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.022

Zabinski, W., 1980. Zincian dolomite: the present state of knowledge. Mineralogia Polonica, 11: 19–32. Retrieved January 16, 2025 from http://www.mineralogia.pl/dokumenty/111.pdf