



Genesis of Tozlou Pb-Zn Occurrence (South of Zanjan): Evidence from Geology, Mineralization, and Geochemistry

Hamed Daneshvar¹ , Hossein Kouhestani^{2*} , Mir Ali Asghar Mokhtari³ , Afshin Zohdi⁴

¹ M.Sc., Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 06 May 2023
Revised: 17 September 2023
Accepted: 17 September 2023

Keywords

Pb-Zn Mineralization
Intermediate-sulfidation Epithermal
Qom Formation
Tozlou
Zanjan

*Corresponding author

Hossein Kouhestani
✉ kouhestani@znu.ac.ir

ABSTRACT

Tozlou Pb-Zn mineralization, ~250-300m long, and ~50m thick, is hosted by limestone units of the Qom Formation. The main mineralization zone occurred as vein-veinlets and vug infill textures, where mineralization is observed as Pb-Zn-bearing barite veins or supergene minerals (cerussite and smithsonite). Mineralization at Tozlou can be divided into five stages. Stage 1 is the decarbonatization of the limestone host rock, which is characterized by the increased porosity and permeability of the host rock. Stage 2 is categorized with dolomitization processes along with minor pyrite. Stage 3 occurred as Pb-Zn-bearing barite and calcite (calcite II) veins. Stage 4 includes late-stage calcite (calcite III) veins. Stage 5 is related to supergene processes. Hydrothermal alterations include decarbonatization, carbonatization ± silicification, and late carbonatization. Ore minerals include galena and pyrite along with minor sphalerite. Calcite, barite, and quartz are gangue minerals. Smithsonite, cerussite, and goethite are formed by supergene processes. The ore minerals show vein-veinlets, brecciated, disseminated, vug infill, colloform, cockade, replacement, and residual textures. The Chondrite-normalized rare earth elements pattern of ore samples, fresh and altered limestones is similar, which can indicate the major role of host rocks in the concentration of ore-forming elements. This pattern is almost similar for different ore samples, which can indicate that they have been formed by the same mineralization system. Characteristics of Tozlou occurrence are comparable with intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.

How to cite this article

Daneshvar, H., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Zohdi, A., 2023. Genesis of Tozlou Pb-Zn Occurrence (South of Zanjan): Evidence from Geology, Mineralization, and Geochemistry. *Journal of Economic Geology*, 15(4): 1–30. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2023.82203.1076>



©2023 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

Epithermal deposits are a group of base/precious-metal deposits that are formed by hydrothermal fluids in shallow environments under pressure/temperature changes and fluid-rock interactions (Hedenquist et al., 2000). Based on the host rock, epithermal deposits are divided into volcanic-hosted deposits and sedimentary-hosted deposits. According to the tectonic setting and magma type, they are divided into calc-alkaline magmas (including three subcategories of high-, intermediate-, and low-sulfidation) and alkaline magmas (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005). These types of deposits include a continuous range of deposits formed by magmatic/meteoritic fluids and show different geometry, but have the same formation mechanism, especially the hydrothermal fluids circulation (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Simmons et al., 2005).

Sedimentary rock-hosted deposits are divided into two groups: Carlin-type and sediment-hosted disseminated deposits. Carlin-type deposits are often formed as strata-bound or replacements at the boundary of rock units and are controlled by faults. They are distinguished by invisible Au in As-rich pyrite and arsenopyrite and do not show compatible spatial relationships to magmatic centers (Kuehn and Rose, 1992). Sediment-hosted disseminated deposits occurred as disseminated ore in sedimentary rocks (Hofstra and Cline, 2000). These deposits are physically and chemically comparable to Carlin-type deposits, but spatially and temporally are related to sub-volcanic porphyry intrusions (Theodore et al., 2000; Hofstra and Cline, 2000).

Tozlou Pb-Zn occurrence is 50km south of Qeydar in Zanjan province. This occurrence was first discovered/explored in 2017. Although general geological characteristics of Tozlou occurrence have been determined (Majidifard and Shafei, 2006), the mineralogy and origin of Tozlou occurrence have not been studied in detail. Here, detailed geology, mineralogy, alteration styles, and geochemistry of Tozlou occurrence are investigated to constrain the genetic model and type of its mineralization system. These results may have implications for future

exploration of base-metal mineralization in this region and nearby areas.

Materials and methods

Comprehensive field and laboratory works have been carried out on Tozlou area. During the fieldwork, a detailed stratigraphic section of limestone units of Qom Formation was measured, sampled, and described. Fifty samples were collected from ore zones and limestone host rocks for laboratory analysis. Then, 34 thin and 15 polished-thin sections were prepared for mineralogical studies in the laboratory at the University of Zanjan, Iran. Fourteen typical samples from the ore zones and fresh/altered host limestone were analyzed for geochemical analysis using ICP-MS in Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran.

Results and Discussion

The main rock units exposed in Tozlou occurrence belong to Eocene sequence, Lower Red Formation, Qom Formation, and Quaternary units. Small outcrops of gabbro-gabbro diorite (gb) can also be seen in this region. Eocene strata include brown thin-bedded sandstone (Unit E^s), alternating tuff and shale (Unit E^{sh}), and thin- to medium-bedded tuffs (Unit E^l). Lower Red Formation includes a polygenetic conglomerate (Unit Ol^{lc}) of Oligocene age. Qom Formation consists of massive- to medium-bedded cream-to-grey limestones (Unit OM_q^l) and alternating marl and thin-bedded grey limestone (Unit OM_q^{ml}). Quaternary units include terrigenous sediments.

Pb-Zn mineralization at Tozlou has ~250-300 m length and ~50 m thick and is hosted by limestone units of Qom Formation. The main mineralization zone occurred as vein-veinlets and vug infill textures, where mineralization is observed as Pb-Zn-bearing barite veins or supergene minerals (cerussite and smithsonite).

Decarbonatization, carbonatization±silicic, dolomitization, and late carbonatization are hydrothermal alterations in Tozlou area. Mineralization processes at Tozlou can be divided into five stages. Stage 1 comprises the decarbonatization of the limestone host rock, which is characterized by the increased porosity and permeability of the host rock. Stage 2 is represented by the dolomitization of the limestone host rock, which is accompanied by minor pyrite. Stage 3 occurs as Pb-Zn-bearing barite and calcite (calcite II)

veins. Stage 4 is characterized by late-stage calcite (calcite III) veins. Stage 5 is related to supergene processes.

Ore minerals include galena and pyrite along with minor sphalerite. Calcite, barite, and quartz are gangue minerals. Smithsonite, cerussite, and goethite are formed by supergene processes. The ore minerals show vein-veinlets, brecciated, disseminated, vug infill, colloform, cockade, replacement, and residual textures. The Chondrite-normalized rare earth

elements patterns of ore samples, fresh and altered limestones, are similar, which can indicate the major role of host rocks in the concentration of ore-forming elements. This pattern is almost similar for different ore samples, which can indicate that they have been formed by the same mineralization system. Despite carbonate host rock, we think that mineralization at Tozlou is similar to the intermediate-sulfidation style of epithermal base metal deposits.



زایش رخداد معدنی سرب و روی توزلو (جنوب زنجان): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی

حامد دانشور^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، میر علی اصغر مختاری^۳، افشین زهدی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۴ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

کانه‌زایی سرب و روی توزلو در پهنه‌ای به طول حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر و ضخامت حدود ۵۰ متر درون واحدهای آهکی سازند قم رخ داده است. سیمای اصلی کانه‌زایی به شکل رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی است که کانه‌زایی به صورت رگه‌های باریتی سرب و روی دار و یا کانی‌های برون‌زاد (سروزیت و اسمیت‌زونیت) مشاهده می‌شود. کانی‌سازی در توزلو به پنج مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانی‌زایی شامل کربنات‌زدایی سنگ میزبان آهکی است که با افزایش تخلخل و نفوذپذیری سنگ میزبان مشخص می‌شود. کانه‌زایی مرحله دوم شامل دولومیتی شدن سنگ میزبان آهکی همراه با اندکی پیریت است. مرحله سوم کانی‌زایی به صورت رگه-رگچه‌های باریتی و کلسیتی (کلسیت نسل دوم) سرب و روی دار است. کانی‌سازی مرحله چهارم دربردارنده رگچه‌های تأخیری کلسیتی (کلسیت نسل سوم) بوده و کانی‌زایی مرحله پنجم مربوط به فرایندهای برون‌زاد است. دگرسانی‌های موجود شامل کربنات‌زدایی، کربناتی ± سیلیسی، دولومیتی و کربناتی تأخیری هستند. گالن و پیریت همراه با اندکی اسفالریت، کانی‌های معدنی و کلسیت، باریت و کوارتز کانی‌های باطله است. اسمیت‌زونیت، سروزیت و گوتیت، در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. ساخت و بافت کانسنگ شامل انواع رگه-رگچه‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، پُرکننده فضای خالی، گل کلمی، کاکلی، جانشینی و بازماندی است. الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ آهک‌های سالم و دگرسان شده مشابه است که می‌تواند بیانگر نقش عمده سنگ‌های میزبان در تمرکز عناصر کانه‌ساز باشد. این الگو برای نمونه‌های کانه‌دار مختلف تقریباً مشابه است که می‌تواند بیانگر تشکیل آنها از یک سامانه کانه‌زایی باشد. ویژگی‌های رخداد معدنی توزلو با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط قابل مقایسه است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی سرب-روی

اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط

سازند قم

توزلو

زنجان

نویسنده مسئول

حسین کوهستانی

kouhestani@znu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

دانشور، حامد؛ کوهستانی، حسین؛ مختاری، میر علی اصغر و زهدی، افشین، ۱۴۰۲. زایش رخداد معدنی سرب و روی توزلو (جنوب زنجان): شواهد زمین‌شناسی،

کانه‌زایی و زمین‌شیمی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۴): ۱-۳۰. <https://doi.org/10.22067/econg.2023.82203.1076>

مقدمه

قیدار در استان زنجان قرار دارد. این رخداد معدنی در سال ۱۳۹۷ توسط بخش خصوصی کشف و فعالیت‌های اکتشافی اولیه بر روی آن انجام شد. هرچند ویژگی‌های زمین‌شناسی عمومی این منطقه در قالب نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مرزبان (Majidifard and Shafei, 2006) مشخص شده و شواهد صحرایی نیز نشان می‌دهد که این رخداد معدنی از نوع رگه‌ای گرمابی با سنگ میزبان کربناته است؛ با این وجود تاکنون بررسی علمی دقیقی در ارتباط با کانه‌زایی که بتواند منشأ آن را تعیین کند، انجام نشده است. در این پژوهش، سعی شده است بر اساس شواهد صحرایی، کانه‌زایی، توالی هم‌یافتی و نوع دگرسانی‌های گرمابی، مدل زایشی رخداد معدنی توزلو بررسی و نوع کانه‌زایی آن تعیین شود. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند در اکتشاف ناحیه‌ای کانسارهای سرب و روی در منطقه توزلو و مناطق مجاور مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

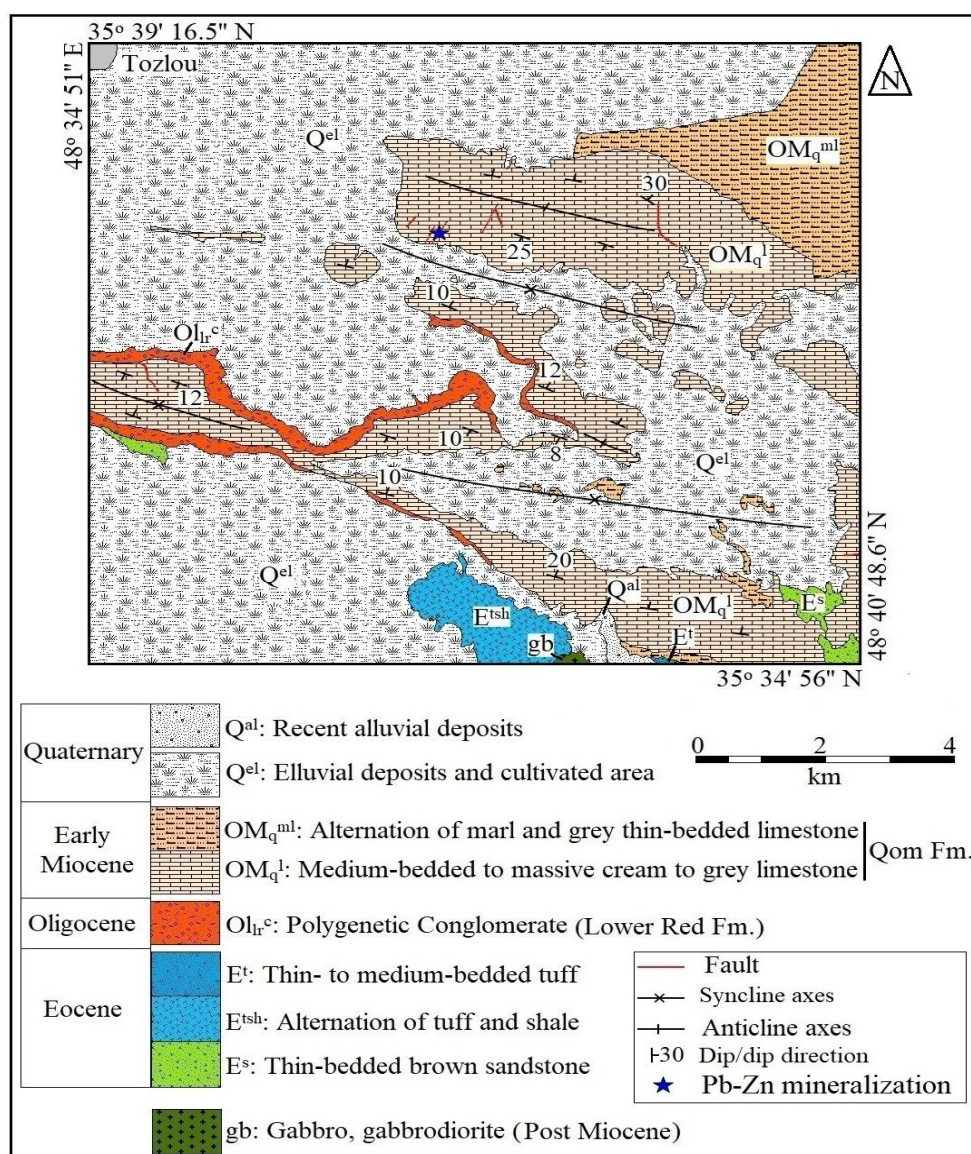
ابتدا پیمایش‌های صحرایی در منطقه انجام شد و ضمن تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰، از واحدهای سنگی و بخش‌های کانه‌دار، نمونه‌برداری (۵۰ نمونه) شد. همچنین، ستون چینه‌شناسی واحدهای رسوبی منطقه ترسیم و جایگاه ماده معدنی بر روی آن مشخص شد. سپس، تعداد ۳۴ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک-صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه و در دانشگاه زنجان بررسی شد. در مرحله بعد، بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، تعداد ۹ نمونه از بخش‌های کانه‌دار و ۲ نمونه از سنگ آهک‌های میزبان سالم و دگرسان‌شده، انتخاب و برای تعیین مقدار عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS تجزیه شدند. برای بررسی ضرایب همبستگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار، علاوه بر ۱۱ نمونه اشاره شده، تعداد ۳ نمونه دیگر از کانسنگ سرب و روی دار به صورت تکه‌های خرده‌سنگی برداشت و به روش ICP-MS تجزیه شدند. تمامی تجزیه‌های شیمیایی در آزمایشگاه شرکت زرآزما، در تهران انجام شده است. برای این منظور،

ذخایر اپی‌ترمال، گروهی از کانسارهای فلزهای پایه و گران‌بها هستند که توسط سیالات گرمابی در محیط‌های کم‌عمق تحت تأثیر تغییرات فشار، حرارت و واکنش سیال-سنگ تشکیل می‌شوند (Hedenquist et al., 2000). این ذخایر بر اساس سنگ میزبان به دو گروه با میزبان آتشفشانی و رسوبی و با توجه به جایگاه زمین‌ساختی و نوع ماگما به دو گروه مرتبط با ماگماهای کالک‌آلکالن (شامل سه زیر رده سولفیداسیون بالا، متوسط و پایین) و آلکالن تفکیک می‌شوند (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist et al., 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Gemmill, 2004; Simmons et al., 2005; Pirajno, 2009). ذخایر اپی‌ترمال طیف پیوسته‌ای از کانسارهای با منشأ سیالات ماگمایی و جوی را در بر گرفته و متناسب با شرایط تشکیل و نقش این سیالات، تظاهراتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند؛ اما سازوکار تشکیل (به ویژه چرخش آب گرم) یکسانی دارند (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Simmons et al., 2005). ذخایر با سنگ میزبان رسوبی با توجه به ارتباط آنها با سیالات ماگمایی به دو گروه نوع کارلین (با فاصله از ماگما) و دانه‌پراکنده با میزبان رسوبی (نزدیک به ماگما) تفکیک می‌شوند. کانسارهای نوع کارلین اغلب به صورت استراتاباند، صفحه‌ای و یا جانشینی در مرز واحدهای سنگی تشکیل شده و توسط گسل‌ها کنترل می‌شوند. کانه‌زایی در این ذخایر به صورت پیریت‌های طلا‌دار با بافت دانه‌پراکنده رخ داده و محتوای سولفید آن بسیار پایین است (Kuehn and Rose, 1992). کانسارهای با میزبان رسوبی به صورت دانه‌پراکنده در سنگ‌های رسوبی واقع شده‌اند (Hofstra and Cline, 2000). این ذخایر در برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با ذخایر نوع کارلین مشابه هستند؛ اما از نظر مکانی و زمانی با توده‌های نیمه عمیق پورفیری ارتباط دارند (Theodore et al., 2000; Hofstra and Cline, 2000; Johnston, 2003). رخداد معدنی سرب و روی توزلو در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب

زمین‌شناسی منطقه توزلو

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مرزبان (Majidifard and Shafei, 2006) و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه توزلو، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه متعلق به توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن، سازند قرمز زیرین، سازند قم و واحدهای کواترنری است (شکل ۱).

ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش خردایش شده و سپس توسط آسیاب تنگستن کاربید به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش پودر شدند. سپس، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی انتخاب و تجزیه شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به روش چند اسید و با استفاده از ماکروویو هضم شد. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۳ تا ۵ درصد بوده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی رخداد معدنی سرب و روی توزلو

Fig. 1. Geological map of the Tozlou Pb-Zn occurrence

سازند قم مهم‌ترین واحد زمین‌شناسی در منطقه توزلو است (شکل ۱). با توجه به پژوهش‌های پیشین و جامعه فسیلی، سن این سازند در استان زنجان میوسن پیشین است (Mohammadi et al., 2013). با توجه به بررسی‌های صحرایی، سازند قم در منطقه توزلو به دو بخش قابل تفکیک است. بخش زیرین این سازند شامل توالی لایه‌های متوسط تا ضخیم لایه سنگ آهک کرم تا خاکستری (واحد OM_q^1) است که به صورت هم‌شیب بر روی کنگلومرای سازند قرمز زیرین (واحد OIr^c) قرار گرفته است (شکل ۲-۱) و (شکل ۲-۲). این واحد سنگی دارای قطعه‌های فسیلی فراوان بوده (شکل ۲-۲) و گاه دارای میان‌لایه‌های آهک مارنی است. واحد OM_q^1 میزبان کانه‌زایی سرب و روی توزلو بوده و در منطقه کانه‌زایی در اثر دگرسانی به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شود. در نتیجه فرایندهای کربنات‌زدایی، بافت اسفنجی و حفره‌ای در سنگ‌های آهکی این واحد قابل مشاهده است. بخش بالایی سازند قم در منطقه توزلو شامل تناوب مارن و سنگ آهک خاکستری (واحد OM_q^{ml}) است که بیشتر در بخش شمال‌شرقی منطقه گسترش دارد (شکل ۱). سنگ آهک‌های این واحد اغلب متوسط تا نازک‌لایه و لایه‌های مارنی آن، نازک‌لایه هستند.

بخش عمده منطقه توزلو توسط رسوبات درج‌ازاد و زمین‌های کشاورزی کواترنری (واحد Q^{el}) پوشیده شده است (شکل ۱) و (شکل ۲-۱ و ۲-۲). توده گابرو-گابروئیدی (واحد gb) به صورت یک رخمون کوچک در بخش جنوبی منطقه توزلو دیده شده و به درون توالی شیلی و توفی ائوسن (واحد E^{tsh}) نفوذ کرده است (شکل ۱). در مقیاس رخمون و نمونه دستی، این توده دارای بافت پورفیریتیک متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن است.

مهم‌ترین عناصر ساختاری در منطقه توزلو، تاقدیس‌ها و ناودیس‌های باز با روند کلی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است که اغلب درون واحدهای سنگی سازند قم و سازند قرمز زیرین رخ داده‌اند (شکل ۱). مجیدی‌فرد و شافعی (Majidifard and Shafei, 2006) تشکیل این چین‌ها را به فازهای دگرشکلی پس

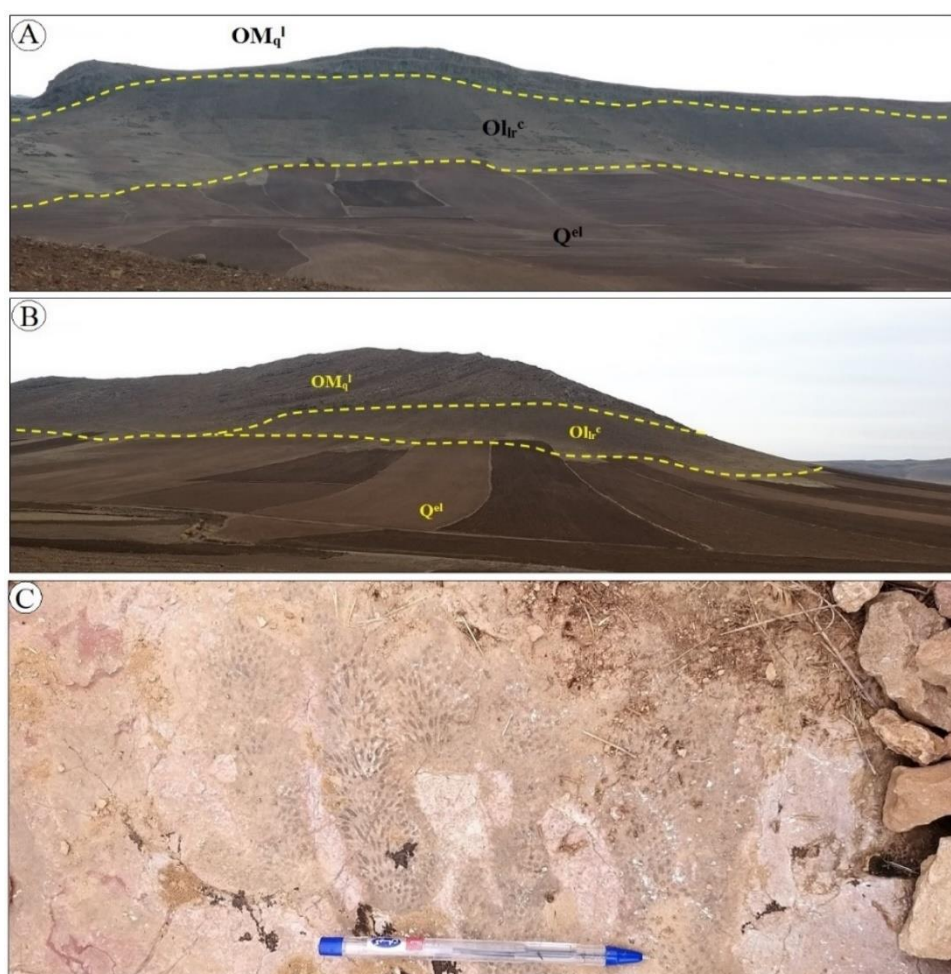
رخمون‌های کوچکی از توده گابرو-گابروئیدی در بخش جنوبی منطقه دیده می‌شود. توده گرانیتوئیدی تخت به سن میوسن (Haghighi Bardineh et al., 2017) در فاصله حدود ۱۵ کیلومتری جنوب‌شرقی رخداد معدنی توزلو واقع شده و به داخل واحدهای سنگی ژوراسیک و کرتاسه نفوذ کرده و به تشکیل کانه‌زایی آهن اسکارنی تخت منجر شده است (Mansouri et al., 2015).

واحد E^s متشکل از لایه‌های نازک ماسه‌سنگ به رنگ قهوه‌ای است که رخمون‌های کوچکی از آن در گوشه جنوب‌شرقی و حاشیه غربی منطقه دیده می‌شود (شکل ۱). این واحد توسط واحد کنگلومرای سازند قرمز زیرین (واحد OIr^c) و لایه‌های آهکی سازند قم (واحد OM_q^1) به صورت ناهم‌شیب پوشیده شده است. واحد E^{tsh} شامل توالی لایه‌های شیلی و توفی نازک‌لایه به رنگ‌های سبز تا خاکستری تیره است که در بخش‌های جنوبی منطقه رخمون دارد (شکل ۱). توده گابرو-گابروئیدی (واحد gb) به داخل این واحد تزریق شده است. هیچ واحد سنگی بر روی این توالی شیلی و توفی مشاهده نمی‌شود. واحد E^t به صورت محدود در مرز جنوبی منطقه رخمون‌داشته و از واحدهای توفی نازک تا متوسط‌لایه تشکیل شده است (شکل ۱). این واحد سنگی توسط توالی مارن و آهک نازک‌لایه سازند قم (واحد OM_q^{ml}) پوشیده شده است. شاید بتوان این واحد سنگی را بخشی از توالی لایه‌های شیلی و توفی نازک‌لایه واحد E^{tsh} در نظر گرفت.

سازند قرمز زیرین در منطقه توزلو شامل کنگلومرای پلی‌ژنتیک قهوه‌ای-قرمز رنگ (واحد OIr^c) به سن الیگوسن است. این واحد کنگلومرای بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر ضخامت داشته و در بخش‌های مرکزی و غربی منطقه رخمون دارد (شکل ۱). واحد OIr^c به صورت هم‌شیب توسط لایه‌های آهکی سازند قم (واحد OM_q^1) پوشیده شده است (شکل ۲-۱ و ۲-۲). قطعه‌های سنگی این واحد کنگلومرای شامل توف، گدازه، ماسه‌سنگ، شیل و واحدهای آهکی و اسلیتی مربوط به کرتاسه و ائوسن است. قطر قله سنگ‌های موجود در کنگلومراها بیشینه به ۳۰ سانتی‌متر می‌رسد.

را قطع کرده‌اند (شکل ۱). شاخص‌ترین گسل در این منطقه، گسل نرمال موجود در منطقه کانه‌زایی سرب و روی با روند N40W و شیب حدود ۵۰ درجه به سمت شمال‌شرق است.

از میوسن مرتبط می‌دانند. به دلیل پوشش بخش زیادی از منطقه توزلو توسط زمین‌های کشاورزی، شناسایی ساختارهای گسلی در این منطقه مشکل است. با این وجود، تعدادی گسل نرمال با راستای اغلب شمال‌غربی - جنوب‌شرقی، توالی رسوبی سازند قم



شکل ۲. A: نمایی از واحد کنگلومرای سازند قرمز زیرین (واحد Ol_{lr}^c) در منطقه توزلو که توسط واحدهای آهکی سازند قم (واحد OM_q^1) پوشیده شده است (دید به سمت جنوب‌غرب)، B: نمایی از واحدهای آهکی سازند قم (واحد OM_q^1) در منطقه توزلو که واحد کنگلومرای سازند قرمز زیرین (واحد Ol_{lr}^c) را پوشانده‌اند (دید به سمت جنوب) و C: نمایی نزدیک از تجمع‌های فسیل مرجانی داخل واحدهای آهکی سازند قم (واحد OM_q^1) در منطقه توزلو

Fig. 2. A: View of the conglomerate unit of the Lower Red Formation (Ol_{lr}^c unit) in the Tozlu area overlain by the limestone units of the Qom Formation (OM_q^1 unit), looking southwest, B: A view of the limestone units of the Qom Formation (OM_q^1 unit) in the Tozlu area overlying the conglomerate unit of the Lower Red Formation (Ol_{lr}^c unit), looking to the south, and C: A close-up view of the coral fossil accumulations within the limestone units of the Qom Formation (OM_q^1 unit) in the Tozlu area

چینه‌نگاری بخش آهکی سازند قم در منطقه توزلو

برای ترسیم ستون سنگ‌چینه‌ای بخش آهکی سازند قم در منطقه توزلو، پروفیلی به طول ۱۴۵ متر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). زیربخش‌های مختلف این پروفیل از پایین به بالا به این شرح است: ۱- آهک ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن تا کرم به ضخامت ۱۵ متر که از متر ۱۰ متری دارای میکروفسیل است، ۲- آهک‌های متوسط لایه با میان لایه‌های مارن به رنگ کرم روشن تا زرد به ضخامت ۱۵ متر، ۳- آهک ضخیم لایه به رنگ خاکستری تیره تا کم‌رنگ حاوی مارن به ضخامت ۳ متر، ۴- مارن با میان لایه‌های آهک به رنگ کرم روشن تا زرد به ضخامت ۱۰ متر، ۵- آهک خاکستری روشن نازک تا متوسط لایه به ضخامت ۱۰ متر که ۳ متر اول شامل آهک‌های دارای ریزفسیل با بافت مادستونی و آهک‌های پرفسیل با بافت پکستونی بوده و حاوی جلبک قرمز و بریوزوا و فرامینفرهای بنتیک است، ۶- آهک‌های ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن به ضخامت ۱۰ متر، ۷- آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای کرم رنگ تا نخودی به ضخامت ۳۰ متر، ۸- آهک‌های نازک تا متوسط لایه با میان لایه‌های مارنی به رنگ قهوه‌ای روشن تا تیره به ضخامت ۱۰ متر، ۹- آهک‌های با رنگ خاکستری روشن به همراه رخساره جلبک قرمز به ضخامت ۵ متر، ۱۰- آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه نخودی رنگ با میان لایه‌های مارنی ۰/۵ متری خاکستری رنگ به ضخامت ۱۰ متر، ۱۱- آهک‌های نازک تا متوسط لایه با میان لایه‌های مارنی به رنگ خاکستری روشن به ضخامت ۱۵ متر، ۱۲- آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن تا کرم به ضخامت ۷ متر و ۱۳- آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای خاکستری روشن تا نخودی رنگ به ضخامت ۵ متر.

تمامی واحدهای سنگی یادشده، به صورت هم‌شیب و پیوسته بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. با توجه به مشاهدات صحرائی و بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی، چهار ریزرخساره رسوبی در سنگ آهک‌های سازند قم در منطقه توزلو، قابل شناسایی است. این ریزرخساره‌ها از مناطق کم‌عمق به سمت مناطق عمیق شامل

ریزرخساره باندستون استروماتولیتی، ریزرخساره مادستون تا وکستون حاوی پلوئید و اووئید، ریزرخساره باندستون حاوی مرجان و جلبک قرمز و ریزرخساره پکستون حاوی جلبک قرمز، خارپوست و فرامینفر بنتیک هستند (Daneshvar, 2023).

کانه‌زایی

کانه‌زایی سرب و روی در رخداد معدنی توزلو با راستای کلی شمال‌شرقی - جنوب‌غربی درون واحدهای آهکی ضخیم لایه تا توده‌ای سازند قم (واحد^۱ OM_q) رخ داده است. پهنه اصلی کانه‌زایی دارای رخنمون طولی حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر و ضخامت حدود ۵۰ متر است (شکل ۴- A). به دلیل عملکرد سیالات گرمایی، واحدهای کربناته میزبان به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شوند. کانه‌زایی سرب و روی به صورت عدسی شکل، رگه - رگچه‌ای و گاه برشی در رخنمون‌های صحرائی قابل مشاهده است. رگه - رگچه‌های سرب و روی، روند عمومی لایه‌بندی (شمال‌غربی - جنوب‌شرقی) واحدهای کربناته میزبان را قطع کرده‌اند (شکل ۴- B و C). این رگه - رگچه‌ها تا ۳۰ متر درازا و ۰/۳ تا ۱ متر پهنا دارند. بیشترین گسترش کانه‌زایی به شکل رگه - رگچه‌های باریتی سرب و روی دار (شکل ۴- D و E) و کانی‌های برونزاد سروزیت و اسمیت‌زونیت به صورت رگه‌ای و پرکننده فضاهای خالی (شکل ۴- F) رخ داده است.

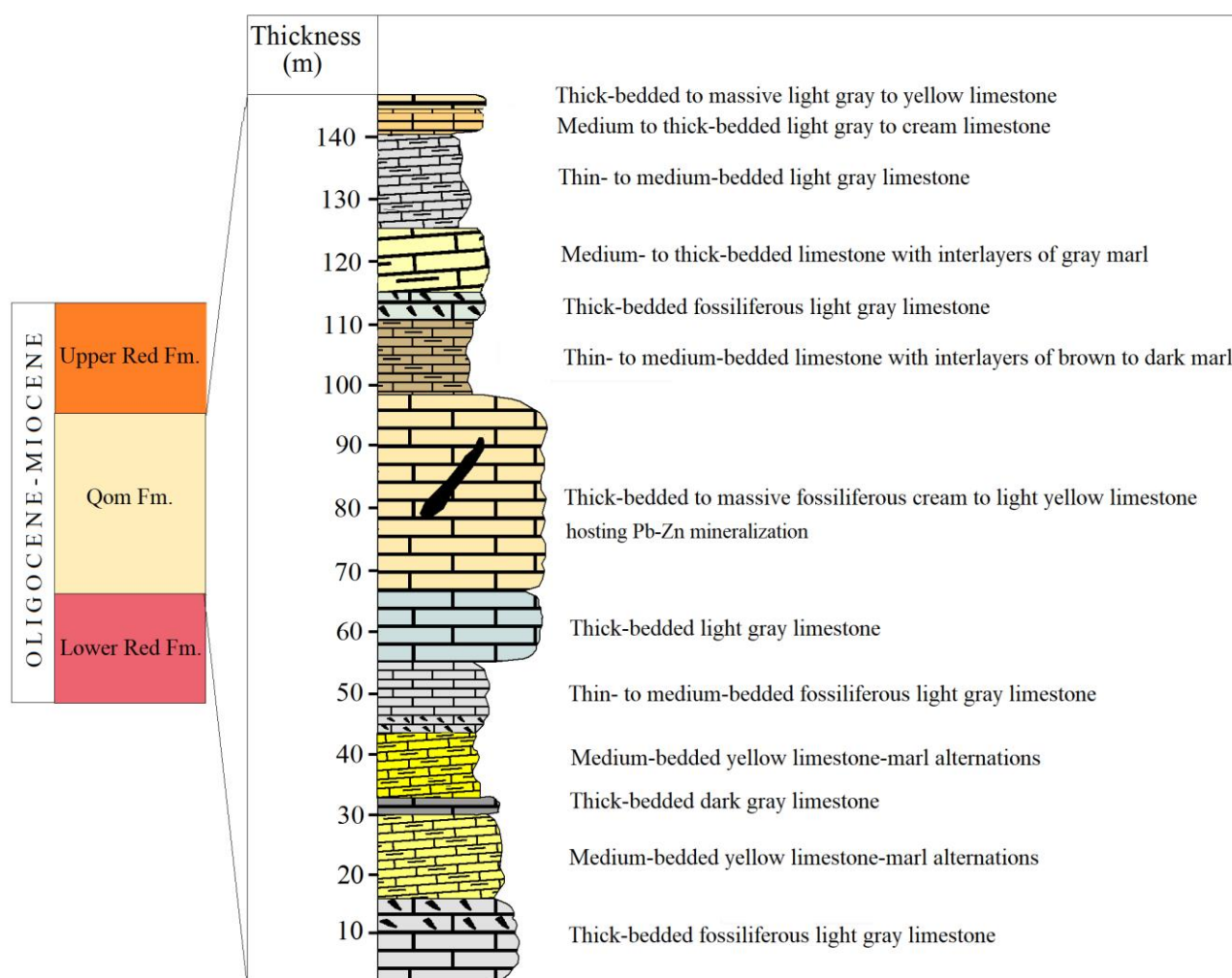
کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنک

گالن و پیریت همراه با اندکی اسفالریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی در رخداد معدنی توزلو هستند. اسمیت‌زونیت، سروزیت و گوتیت، در اثر فرایندهای برونزاد تشکیل شده‌اند. کلسیت، باریت و کوآرتز، کانی‌های باطله در این رخداد معدنی هستند. ساخت و بافت کانسنک شامل انواع رگه - رگچه‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، پُرکننده فضای خالی، گل کلمی، کاکلی، جان‌شینی و بازماندی است.

گالن کانه اصلی در رخداد معدنی توزلو است. گالن معمولاً از

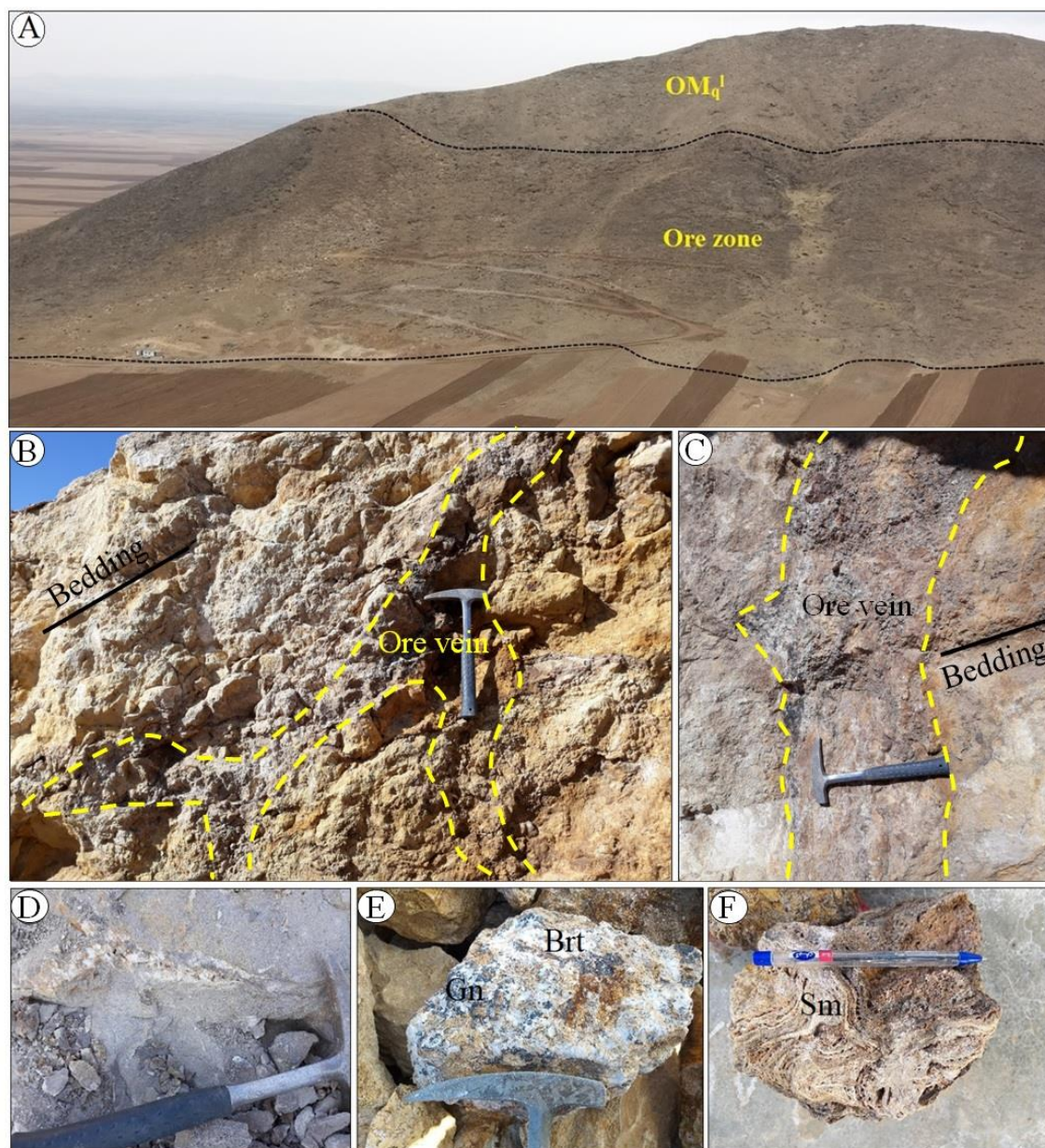
بلورهای ریز بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در سیمان کلسیتی برخی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اسمیت‌زونیت یکی از کانه‌های غالب موجود در رخداد معدنی توژلو است که اغلب به صورت بلورهایی با ساختار رشته‌ای و شعاعی در مسیر شکستگی‌ها و حفره‌های سنگ متمرکز شده است (شکل ۵-D). با توجه به فراوانی محدود اسفالریت در نمونه‌های بررسی شده، به نظر می‌رسد بخش عمده اسفالریت طی فرایندهای برون‌زاد به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است.

حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به سروزیت دگرسان شده است (شکل ۵-A). گاه این دگرسانی شدت بیشتری داشته و بقایای گالن به صورت بافت جزیره‌ای در متن سروزیت دیده می‌شود. در برخی نقاط، پیریت به صورت ادخال‌هایی داخل گالن دیده می‌شود (شکل ۵-B) که بیانگر تبلور پیریت قبل از گالن در توالی هم‌یافتی است. پیریت به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و با بافت دانه‌پراکنده مشاهده می‌شود. پیریت‌ها اغلب به گوتیت دگرسان شده و بقایای اندکی از آنها با بافت جزیره‌ای باقی مانده است (شکل ۵-C). اسفالریت با فراوانی بسیار کم به صورت



شکل ۳. ستون سنگ‌چینه‌ای بخش آهکی سازند قم در منطقه توژلو

Fig. 3. Lithostratigraphy column of the limestone part of the Qom Formation in the Tozlu area



شکل ۴. تصویرهای صحرایی و نمونه دستی از پهنه کانه‌زایی در رخداد معدنی سرب و روی توزلو. A: نمایی از پهنه کانه‌زایی درون واحدهای آهکی سازند قم (دید به سمت شمال‌باختر). موقعیت ترانسه‌های اکتشافی در مرکز تصویر قابل مشاهده است، B و C: نماهایی نزدیک از رگه‌های کانه‌دار که لایه‌بندی واحدهای آهکی میزبان خود را قطع کرده‌اند، D و E: نماهایی نزدیک از رگه‌های باریتی سرب و روی‌دار و F: کانه‌زایی اسمیت‌زونیت در نمونه دستی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Gn: گالن، Sm: اسمیت‌زونیت).

Fig. 4. Field and hand specimen photographs of the mineralization zone in the Tozlu Pb-Zn occurrence. A: A view of the mineralization zone within the limestone units of the Qom Formation, looking northwest. The location of the exploration trenches are observed in the center of the photo, B and C: Close views of ore veins that cut the bedding of host limestone units, D and E: Close views of Pb-Zn-bearing barite veins, and F: Smithsonite mineralization in hand specimen. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Gn: galena, Sm: smithsonite).

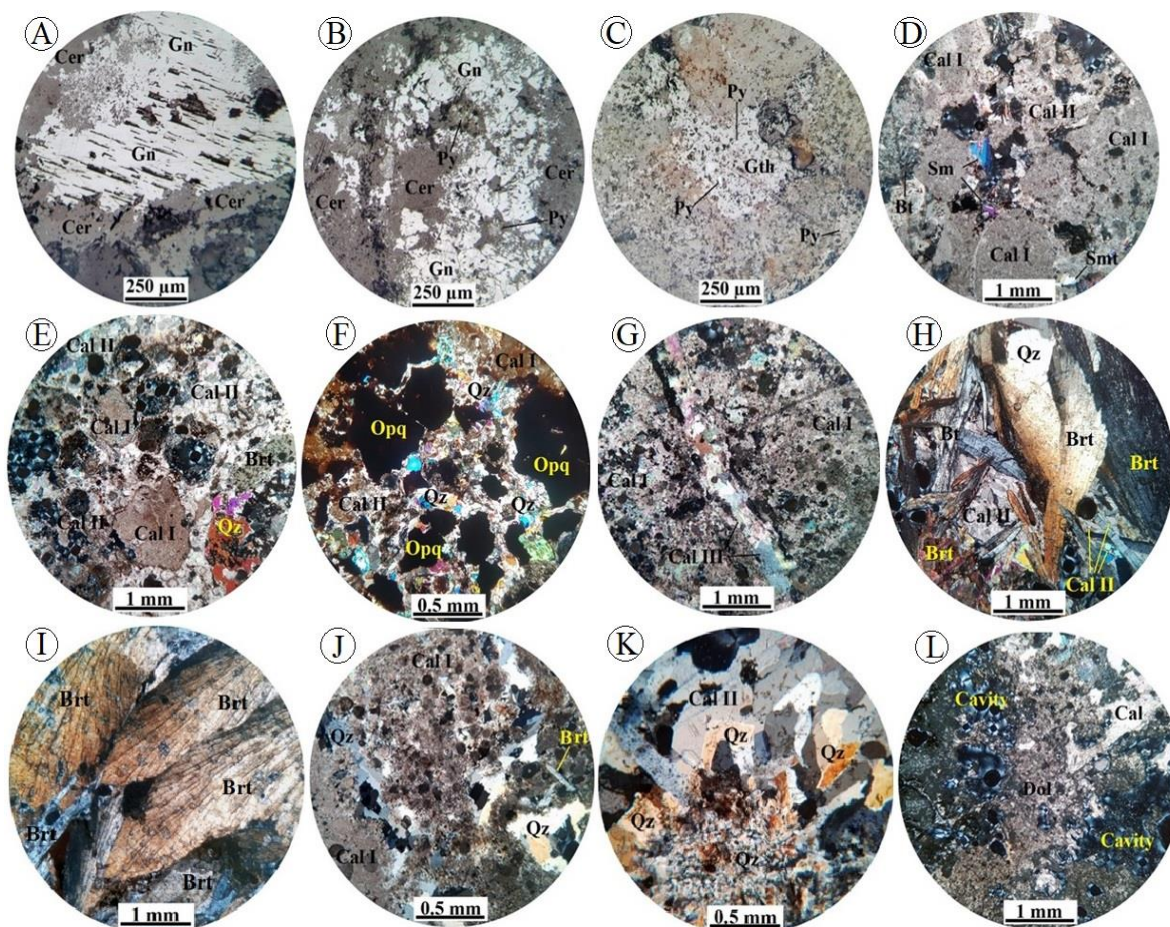
دگرسانی کربنات‌زدایی سبب انحلال کلسیت از سنگ‌های آهکی سازند قم شده و به صورت آهک متخلخل به رنگ خاکستری تیره تا قهوه‌ای مشاهده می‌شوند. این دگرسانی نقشی مهم در ایجاد فضاهای خالی و افزایش نفوذپذیری سنگ میزبان داشته و از مشخصه‌های مهم کانسارهای گرمابی است که تحت تأثیر سیالات گرمابی در سنگ‌های میزبان کربناته تشکیل می‌شوند. دگرسانی کربناتی محصول اضافه شدن کلسیت، دولومیت و کربنات‌های مضاعف آهن، منگنز، کلسیم و منیزیم در کربنات‌های اولیه است که تحت تأثیر سیالات گرمابی واقع شده‌اند. دو نوع دگرسانی کربناتی در رخداد معدنی توزلو قابل تفکیک است. دگرسانی کربناتی نوع اول اغلب به صورت رگه‌ای داخل پهنه کربنات‌زایی شده مشاهده شده و همراهی نزدیکی با کانه‌زایی سرب و روی دارد. کلسیت‌های گرمابی تشکیل شده طی این دگرسانی (کلسیت نسل دوم) نسبت به کلسیت‌های اولیه سنگ آهک سازند قم (کلسیت نسل اول)، درشت‌بلورتر و شفاف‌تر هستند (شکل ۵-۵ E و F). در برخی نقاط، تجمع‌های کوچکی از کوارتز با کلسیت‌های حاصل از این دگرسانی همراهی می‌شود (شکل ۵-۵ F). دگرسانی کربناتی نوع دوم شامل رگه-رگچه‌های کلسیتی تأخیری (کلسیت نسل سوم) است (شکل ۵-۵ J).

دگرسانی دولومیتی شدن شامل تشکیل بلورهای ریز نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار دولومیت است (شکل ۵-۵ L). دگرسانی دولومیتی شدن از شدت کمی در رخداد معدنی توزلو برخوردار بوده و بیشتر در حاشیه رگه-رگچه‌های باریتی-کلسیتی حاوی کانه‌زایی رخ داده است. دگرسانی برونزاد از گسترش قابل توجهی در منطقه توزلو برخوردار بوده و اغلب به صورت پهنه‌های هیدروکسید آهنی قابل مشاهده است که سبب تغییر رنگ قرمز و قهوه‌ای سنگ آهک‌های میزبان کانه‌زایی شده است. طی دگرسانی برونزاد، کانی‌هایی سولفیدی اولیه به اسمیت‌زونیت، سرروزیت و گوتیت دگرسان شده‌اند. در بخش‌های سطحی، عمده کانه‌زایی سرب و روی منطقه مربوط به این دگرسانی است.

کلسیت باطله اصلی در رخداد معدنی توزلو بوده و به سه نسل قابل تفکیک است. نسل اول شامل بلورهای ریز کلسیت مربوط به سنگ میزبان آهکی سازند قم است (شکل ۵-۵ D). نسل دوم کلسیت در رگه‌های کلسیت-باریت \pm کوارتز کانه‌دار مشاهده می‌شود. بلورهای کلسیت این مرحله درشت‌تر از کلسیت‌های نسل اول بوده و اغلب فضای بین باریت‌ها را پر کرده‌اند (شکل ۵-۵ D تا F). کلسیت‌های نسل سوم به صورت رگچه‌های تأخیری (ضخامت کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) بوده و نسل‌های قبلی را قطع کرده‌اند (شکل ۵-۵ G). باریت اغلب به صورت بلورهای رشته‌ای و شعاعی شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در مقاطع میکروسکوپی دیده شده و ابعاد طولی بلورهای آن گاه تا یک سانتی‌متر نیز می‌رسد (شکل ۵-۵ H و I). باریت همراه با کلسیت‌های نسل دوم تشکیل شده و همراهی نزدیکی با کانه‌زایی سرب و روی دارد. فضای بین بلورهای باریت توسط کلسیت‌های نسل دوم و گاه بلورهای کوارتز پر شده است (شکل ۵-۵ H). کوارتز اغلب فضای بین بلورهای باریت و کلسیت نسل دوم را پر کرده است (شکل ۵-۵ F و H). کوارتز همچنین در مسیر شکستگی‌های کلسیت‌های نسل اول نیز قابل مشاهده است (شکل ۵-۵ J). در برخی نقاط، بلورهای کوارتز بر روی قطعه سنگ اولیه سیلیسی شده رشد کرده و سبب تشکیل بافت کاکلی شده‌اند (شکل ۵-۵ K). دولومیت به میزان کم و اغلب به صورت بلورهای ریز و متوسط، نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در حاشیه شکستگی‌ها دیده می‌شود (شکل ۵-۵ L).

دگرسانی گرمابی

بر اساس یافته‌های صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی توزلو شامل کربنات‌زدایی، کربناتی‌شدن، دولومیتی‌شدن و دگرسانی برونزاد است. دگرسانی کربنات‌زدایی حاصل انحلال کربنات‌ها در اثر واکنش محلول‌های گرمابی اسیدی با سنگ‌های کربناته است. این دگرسانی از گسترش زیادی در رخداد معدنی توزلو برخوردار بوده و پهنایی حدود ۵۰ متر و درازایی حدود ۳۰۰ متر دارد.



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی (تصویرهای A تا C در نور بازتابی و بقیه در نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت ماده معدنی در رخداد معدنی سرب و روی توژلو. A: بلور درشت گالن که از حاشیه‌ها به سرزیت دگرسان شده است، B: ادخال‌های پیریت داخل گالن. دگرسانی گالن به سرزیت نیز دیده می‌شود، C: بقایای پیریت با بافت بازماندی داخل گوتیت، D: اسمیت‌زونیت در بین بلورهای کلسیت نسل اول و دوم، E: قطعه‌های سنگ میزبان آهکی (کلسیت نسل اول) با سیمان کلسیت نسل دوم، F: کلسیت نسل دوم و کوارتز در فضای بین کانی‌های کدر (اغلب گالن)، G: رگچه کلسیتی نسل سوم که بلورهای کلسیت نسل اول را قطع کرده است، H: بلورهای باریت همراه با کلسیت نسل دوم و کوارتز، I: باریت با بافت شعاعی، J: کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی، K: بافت کاکلی کوارتز. کلسیت نسل دوم فضاهای خالی را پر کرده است و L: بلورهای ریز دولومیت در پهنه کانه‌زایی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Cal: کلسیت، Cer: سرزیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Opq: کانی کدر، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Sm: اسمیت‌زونیت).

Fig. 5. Photomicrographs (A to C in reflected light and the rest in transmitted cross-polarized light, XPL) of the ore mineralogy and texture in the Tozlou Pb-Zn occurrence. A: Coarse-grained galena crystal that altered to cerussite along the boundaries, B: Pyrite inclusions within galena. Alteration of galena to cerussite is also observed, C: Remnants of pyrite with relict texture within goethite, D: Smithsonite among the first and second generation of calcite crystals, E: Fragments of the limestone host rock (first-generation calcite) with second-generation calcite cement. F: Second-generation calcite and quartz in the vug between opaque minerals (mainly galena), G: Calcite veins of the third generation crosscut the first-generation calcite crystals, H: Barite crystals along with second-generation calcite and quartz, I: Barite with radial texture, J: Quartz with vug infill texture, K: Cockade texture of quartz. Calcite of the second generation filled the vugs, and L: Fine-grained dolomite crystals in the mineralized zone. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Cal: calcite, Cer: cerussite, Dol: dolomite, Gn: galena, Gth: goethite, Opq: opaque mineral, Py: pyrite, Qz: quartz, Sm: smithsonite).

مراحل کانه‌زایی و توالی هم‌یافتی کانی‌ها

با توجه به مجموعه کانی‌شناسی، روابط بافتی و ارتباط قطع‌کنندگی، فرایند کانه‌زایی در رخداد معدنی سرب و روی توزلو به پنج مرحله قابل تفکیک است (شکل ۶).

مرحله اول کانی‌زایی شامل کربنات‌زدایی سنگ میزبان آهنی است که طی این فرایند، تداخل و در نتیجه نفوذپذیری سنگ میزبان بیشتر شده و محیط برای ورود سیالات کانه‌دار آماده می‌شود. در این مرحله، هیچ کانی تشکیل نشده است. مرحله دوم کانه‌زایی شامل دولومیتی شدن سنگ میزبان آهنی است که در نتیجه ورود سیالات گرمابی، مسیرهای عبور سیالات به صورت محدود دولومیتی شده است. مقدار اندکی پیریت در این مرحله تشکیل شده است. کانی‌زایی مرحله سوم در بردارنده رگه-رگچه‌های باریتی و کلسیتی (کلسیت نسل دوم) سرب و روی دار است. در نتیجه عملکرد سیالات گرمابی و تنش حاصل از سیالات، سنگ میزبان کربنات‌زدایی و دولومیتی شده مرحله قبلی، متحمل

خردشدگی و شکستگی شده و کانی‌سازی به حالت برشی، رگه-رگچه‌ای و پُرکننده فضاها‌ی خالی تشکیل شده است. در نتیجه تراوش سیالات به داخل سنگ میزبان، کانه‌زایی دانه‌پراکنده نیز تشکیل شده است. کانه‌های تشکیل شده در این مرحله شامل گالن همراه با اندکی اسفالریت و پیریت با بافت دانه‌پراکنده و رگه-رگچه‌ای هستند که با رگه-رگچه‌های کلسیتی نسل دوم، باریت و مقدار اندکی کوارتز همراهی می‌شوند. مرحله چهارم کانی‌سازی شامل رگچه‌های تأخیری کلسیتی (کلسیت نسل سوم) است که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. در مقیاس رخنمون، این رگچه‌ها از گسترش بسیار محدودی برخوردار بوده و بیشتر در مقاطع میکروسکوپی قابل شناسایی هستند. مرحله پنجم کانه‌زایی مربوط به فرایندهای برون‌زاد بوده و طی آن کانی‌های اسمیت‌زونیت، سرروزیت و گوتیت با بافت‌های گل‌کلمی، باقی‌مانده و جانشینی تشکیل شده‌اند.

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Supergene
Pyrite					
Galena					
Sphalerite					
Smithsonite					
Cerussite					
Goethite					
Calcite					
Barite					
Quartz					
Dolomite					
Vein-Veinlets					
Brecciated					
Disseminated					
Cockade					
Colloform					
Vuggy					
Vug Infill					
Relict					
Replacement					

شکل ۶. توالی هم‌یافتی، فراوانی نسبی و ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی توزلو

Fig. 6. Paragenetic sequences showing the relative abundance, and structure and, texture of gangues and ore minerals at the Tozlu occurrence

بحث و بررسی

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به دست آمده از نمونه‌های رخداد معدنی توزلو در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

ضرایب همبستگی عناصر

ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز در رخداد معدنی توزلو که بر اساس داده‌های جدول ۱ و جدول ۲ محاسبه شده است، در جدول ۳ آورده شده و در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱. داده‌های تجزیه شیمیایی (بر حسب گرم در تن) برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در رخداد معدنی توزلو. (T2: کانسنگ سرب و روی دار، T3 و T11: کانسنگ غنی از اسمیت‌زونیت، T4 و T15: کانسنگ گالن، T6 و T10: کانسنگ غنی از گالن، T12 و T13: رگه باریتی با گالن دانه‌پراکنده، T18: سنگ آهک دگرسان‌شده، T23: سنگ آهک سالم)

Table 1. Geochemical data (in ppm) for mineralized samples and host rocks from the Tozlu occurrence. (T2: Pb-Zn-bearing ore, T3 and T11: Sm-rich ore, T4 and T15: Gn ore, T6 and T10: Gn-rich Brt ore, T12 and T13: Brt vein with disseminated Gn, T18: Altered limestone, T23: Fresh limestone)

	Ag	As	Ba	Ca	Cd	Ce	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd
T2	34.9	52.2	>10000	>100000	80.9	1	18	0.1	0.2	5.85	2601	0.32
T3	0.6	79.5	4496	18737	563.6	<0.5	62	0.2	0.2	1.34	11380	0.33
T4	209.6	>100	191	16875	11.3	<0.5	48	<0.1	<0.1	<0.1	2675	0.14
T6	69.3	>100	786	76330	257.3	<0.5	54	<0.1	<0.1	0.16	21588	0.17
T10	76	72.5	1636	>100000	60.7	1	29	<0.1	0.2	0.45	3395	0.24
T11	10.7	52.5	4719	>100000	304.3	2	49	0.2	0.2	1.56	17369	0.38
T12	7.9	39	2004	>100000	100.7	<0.5	22	<0.1	<0.1	0.62	7708	0.19
T13	99.6	70.6	2522	74060	535.7	<0.5	85	<0.1	0.1	0.79	17529	0.24
T15	121.7	>100	2055	4653	5.4	<0.5	12	<0.1	<0.1	0.4	326	0.07
T18	1.3	18.4	514	>100000	4.1	<0.5	10	<0.1	<0.1	0.13	9107	0.16
T23	0.3	11.7	523	>100000	1.4	2	7	0.4	0.3	1.06	3622	0.46
	La	Lu	Mg	Mn	Mo	Nd	P	Pb	Pr	S	Sb	Sm
T2	1	0.1	1302	1872	1.7	2.9	302	>30000	0.4	6345	28.2	6.4
T3	<1	<0.1	5755	1938	3.5	3.2	217	4056	0.19	1053	35	0.5
T4	<1	<0.1	721	522	2.4	2.5	185	>30000	0.05	>30000	94.6	<0.1
T6	<1	<0.1	12527	838	7.4	2.7	212	>30000	0.09	5842	53.9	<0.1
T10	1	<0.1	1295	1489	1.1	3.2	271	>30000	0.33	4278	67	<0.1
T11	1	<0.1	7164	3116	4.7	3.9	363	15803	0.34	2344	20	0.8
T12	<1	<0.1	>20000	974	3.4	3.2	200	12340	0.15	2030	41.1	<0.1
T13	<1	<0.1	>20000	6263	4.5	3.1	193	>30000	0.15	3166	150.1	<0.1
T15	<1	<0.1	154	<5	1.3	2.7	137	>30000	<0.05	3819	21	<0.1
T18	<1	<0.1	>20000	3058	2.3	2.8	199	5047	0.21	255	5	<0.1
T23	1	<0.1	1934	2887	3	4.3	246	313	0.43	979	3	0.2
	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Tl	Tm	U	V	Y	Yb	Zn
T2	1091.4	0.3	0.1	<0.5	0.4	0.3	<0.1	6.6	13	1.8	0.43	11000
T3	105.8	<0.1	0.1	10.3	0.3	1.9	<0.1	2.9	7	1.6	0.11	>30000
T4	1329	<0.1	<0.1	0.8	0.2	0.7	<0.1	2.9	5	<0.5	<0.05	3541
T6	1065.7	<0.1	<0.1	1.5	0.2	6.6	<0.1	5.8	5	0.5	0.23	>30000
T10	1548.1	<0.1	0.1	1.8	0.3	0.2	<0.1	4.7	12	1.5	0.4	7245
T11	1012.2	<0.1	0.1	10.6	0.5	3.5	<0.1	4.9	27	1.4	0.46	>30000
T12	2380.3	<0.1	0.1	5.1	0.2	4	<0.1	2.1	10	0.9	0.26	28913
T13	3109	<0.1	0.1	5.3	0.3	3.4	<0.1	5.7	13	1.1	0.25	>30000
T15	427.2	<0.1	<0.1	0.7	0.2	<0.1	<0.1	3.3	2	<0.5	<0.05	267
T18	76.2	<0.1	<0.1	<0.5	0.3	3.1	<0.1	1.7	5	0.8	0.41	5948
T23	337.5	<0.1	0.2	5.2	0.5	0.3	<0.1	3	13	3	0.61	960

بر این اساس، سرب همبستگی مثبت متوسط با نقره (۰/۶۴) دارد که می‌تواند به حضور نقره در شبکه گالن دلالت داشته باشد. همبستگی بالای نقره با گوگرد (۰/۹۱) نیز منعکس کننده حضور نقره در شبکه کانی گالن است. بر همین اساس، سرب همبستگی منفی ضعیفی (۰/۱۳-) با روی دارد که احتمالاً مرتبط با دگرسانی و از بین رفتن اسفالریت در نمونه‌های حاوی گالن است. روی همبستگی مثبت قوی (۰/۸۲) با کادمیم دارد. این امر می‌تواند به دلیل شباهت ویژگی‌های شیمیایی Zn^{2+} با Cd^{2+} و جایگزینی Cd^{2+} به جای Zn^{2+} در ساختار کانی‌های روی‌دار باشد. نقره همبستگی مثبت متوسط با آنتیموان (۰/۶۲) دارد. همبستگی مثبت نقره و آنتیموان می‌تواند نشان‌دهنده همراهی این دو عنصر در سیالات گرمابی تأمین کننده عناصر کانه‌ساز باشد. همبستگی متوسط آنتیموان (۰/۶۵) و آرسنیک (۰/۴۸) با سرب نیز می‌تواند نشانه دیگری از همراهی این عناصر در سیالات گرمابی تأمین کننده عناصر کانه‌ساز باشد.

جدول ۲. داده‌های تجزیه شیمیایی (گرم در تن) برای نمونه‌های برداشت شده از کانسنگ سرب و روی‌دار در رخداد معدنی توزلو. nd: قرائت نشده

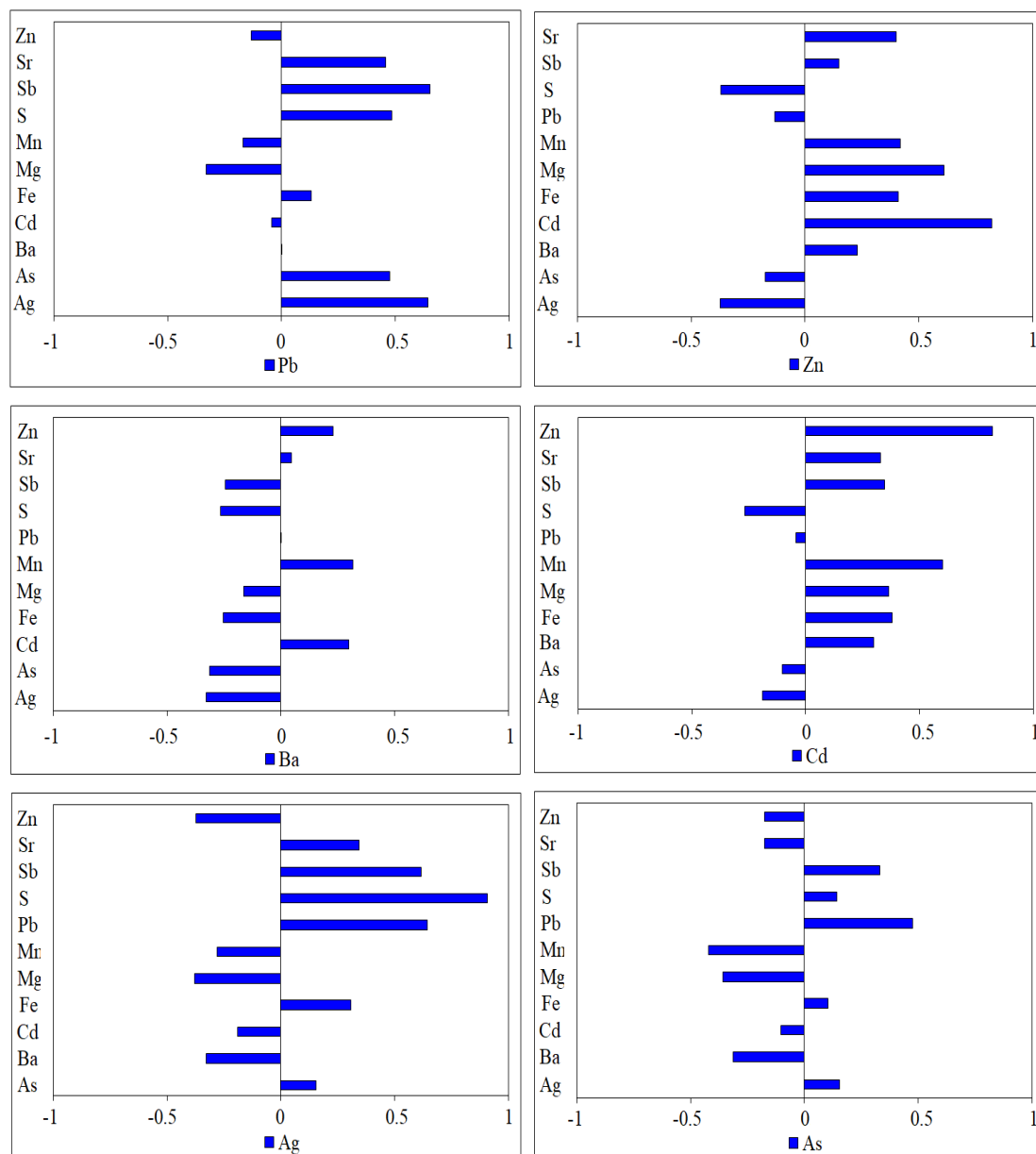
Table 2. Geochemical data (ppm) for samples collected from Pb-Zn-bearing ore at the Tozλου occurrence. nd: not detected

	Ag	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe
96-ZR-3330	24.8	3304	314.2	n.d	n.d	25524	16.4	2	5	38	<	10000
96-ZR-4478	2	1891	63.8	136	<1	10000	17.5	3	8	41	13	10000
96-ZR-3512	270.2	295	>100	164	<1	2621	13.2	1	1	12	86	28777
	K	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb
96-ZR-3330	n.d	2	2	1072	88	11.4	n.d	5	2409	>30000	3463	69
96-ZR-4478	312	2	2	10492	394	6.2	362	10	156	593	405	11.4
96-ZR-3512	<1	<1	1	192	35	0.85	262	3	54	>30000	>30000	91.1
	Sc	Sr	Th	Ti	U	V	Y	Yb	Zn	Zr		
96-ZR-3330	<0.5	n.d	3.8		n.d	88	1	1.9	5558	n.d		
96-ZR-4478	<0.5	137	7.1	74	29	84	6	1.3	13872	7		
96-ZR-3512	<0.5	1421	1.8	23	<5	2	<0.5	0.2	2179	<5		

جدول ۳. ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه شده بر مبنای جدول ۱ و جدول ۲) برای نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توزلو

Table 3. Elemental correlation coefficient (calculated based on Table 1 and Table 2) for samples collected from mineralized zones at the Tozלו occurrence.

	Ag	As	Ba	Cd	Fe	Mg	Mn	Pb	S	Sb	Sr	Zn
Ag	1.00											
As	0.16	1.00										
Ba	-0.33	-0.31	1.00									
Cd	-0.19	-0.10	0.30	1.00								
Fe	0.31	0.10	-0.25	0.38	1.00							
Mg	-0.38	-0.36	-0.16	0.37	0.25	1.00						
Mn	-0.28	-0.42	0.32	0.60	0.12	0.52	1.00					
Pb	0.64	0.48	0.00	-0.04	0.13	-0.33	-0.17	1.00				
S	0.91	0.14	-0.26	-0.27	0.27	-0.42	-0.37	0.49	1.00			
Sb	0.62	0.33	-0.24	0.35	0.38	0.07	0.25	0.65	0.49	1.00		
Sr	0.34	-0.18	0.05	0.33	0.25	0.38	0.42	0.46	0.22	0.73	1.00	
Zn	-0.37	-0.18	0.23	0.82	0.41	0.61	0.42	-0.13	-0.37	0.15	0.40	1.00



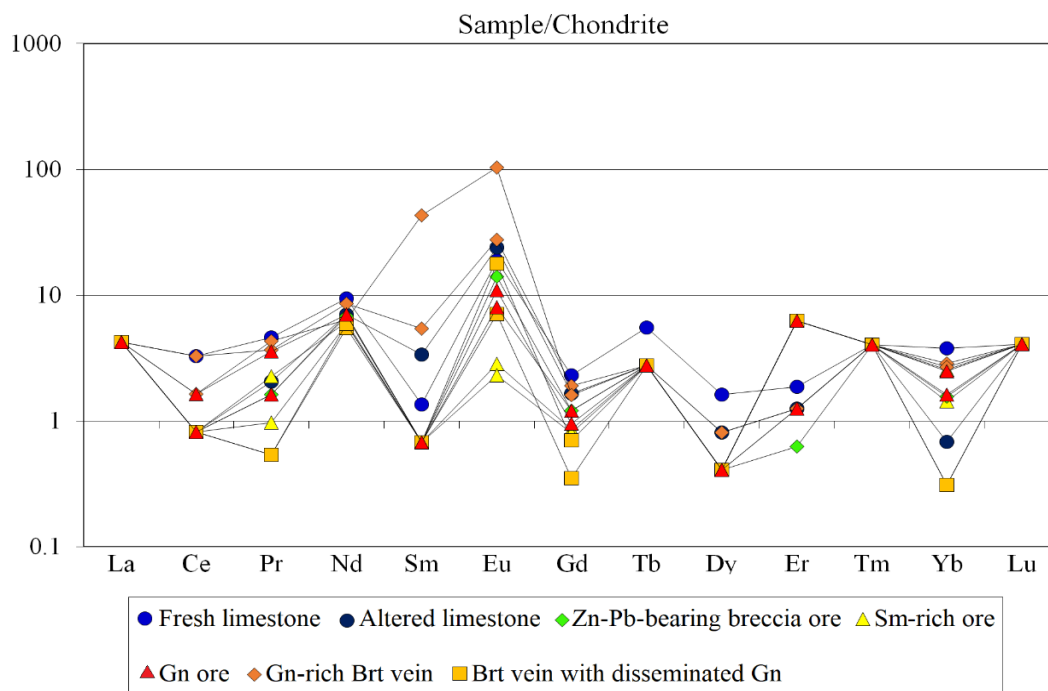
شکل ۷. نمودار همبستگی عناصر کانه‌ساز برای نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توزلو

Fig. 7. Correlation chart of ore-forming elements for samples collected from mineralized zones at the Tozlu occurrence

تقریباً با الگوی این عناصر در سنگ آهک‌های میزبان مشابه است که می‌تواند بیانگر نقش عمده سنگ‌های میزبان در تمرکز عناصر کانه‌ساز باشد. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار مختلف تقریباً مشابه است که می‌تواند بیانگر تشکیل آنها از یک سامانه کانه‌زایی باشد.

الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ آهک‌های سالم و دگرسان شده در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، الگوی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار



شکل ۸. الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ آهک‌های میزبان در رخداد معدنی توزلو که نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) بهنجار شده‌اند.

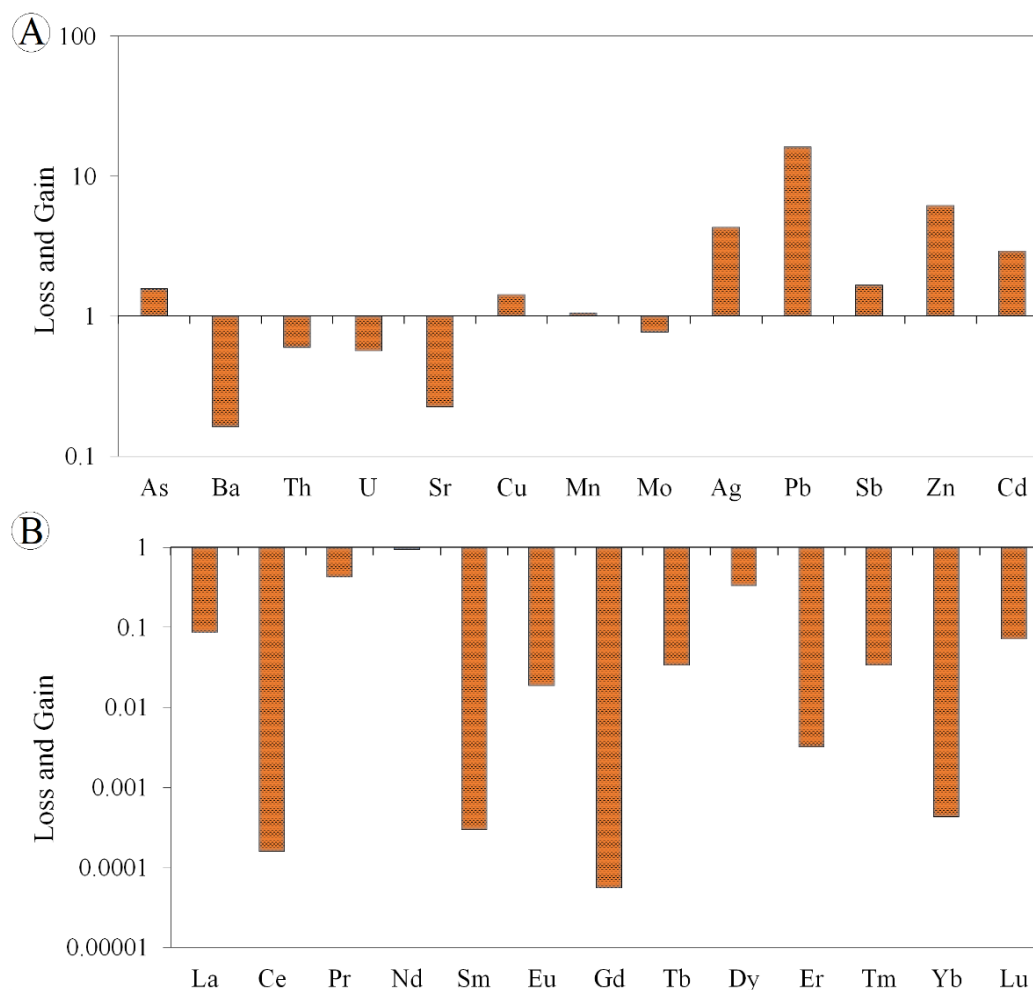
Fig. 8. A: Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE pattern for the mineralized samples and host limestone rocks in the Tozlu occurrence.

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر

برای بررسی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عنصری مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی در رخداد معدنی توزلو، داده مربوط به سنگ آهک دگرسان‌شده بر داده مربوط به سنگ آهک سالم و داده‌های نمونه‌های کانه‌دار بر داده‌های مربوط به سنگ آهک‌های سالم و دگرسان‌شده و میانگین پوسته قاره‌ای (Rudnick and Gao, 2003) بهنجار شد تا عناصر اضافه و یا کم‌شده به سنگ طی دگرسانی و کانه‌زایی مشخص شود (شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲). این روش کیفی بوده و برای تعیین میزان کمی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این پژوهش انجام شده است. بر اساس شکل ۹-۸، سنگ آهک دگرسان‌شده در مقایسه با سنگ آهک سالم از عناصر باریم، توریم، اورانیم، استرانسیم و مولیبدن تهی و از عناصر نقره، سرب، روی، کادمیم و تا حدودی آرسنیک، مس و

منگنز غنی شده است. نمونه سنگ آهک دگرسان‌شده نسبت به سنگ آهک سالم از همه عناصر کمیاب خاکی تهی شده است (شکل ۹-۸).

نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با سنگ آهک سالم تقریباً از همه عناصر کمیاب به جز منگنز (یکی از نمونه‌های مربوط به رگه باریتی با گالن دلنه‌پراکنده از منگنز غنی شده است) غنی شده‌اند و تنها یکی از نمونه‌های مربوط به کانسنک گالن از عناصر باریم و روی و یکی از نمونه‌های کانسنک غنی از اسمیت‌زونیت از عنصر استرانسیم تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۰-۸). در مقایسه با سنگ آهک سالم، تقریباً تمامی نمونه‌های کانه‌دار از عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند و تنها برخی از نمونه‌های کانه‌دار از عناصری مانند ساماریم و ارییم و به‌طور محدود یوروپیم، غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۰-۸).

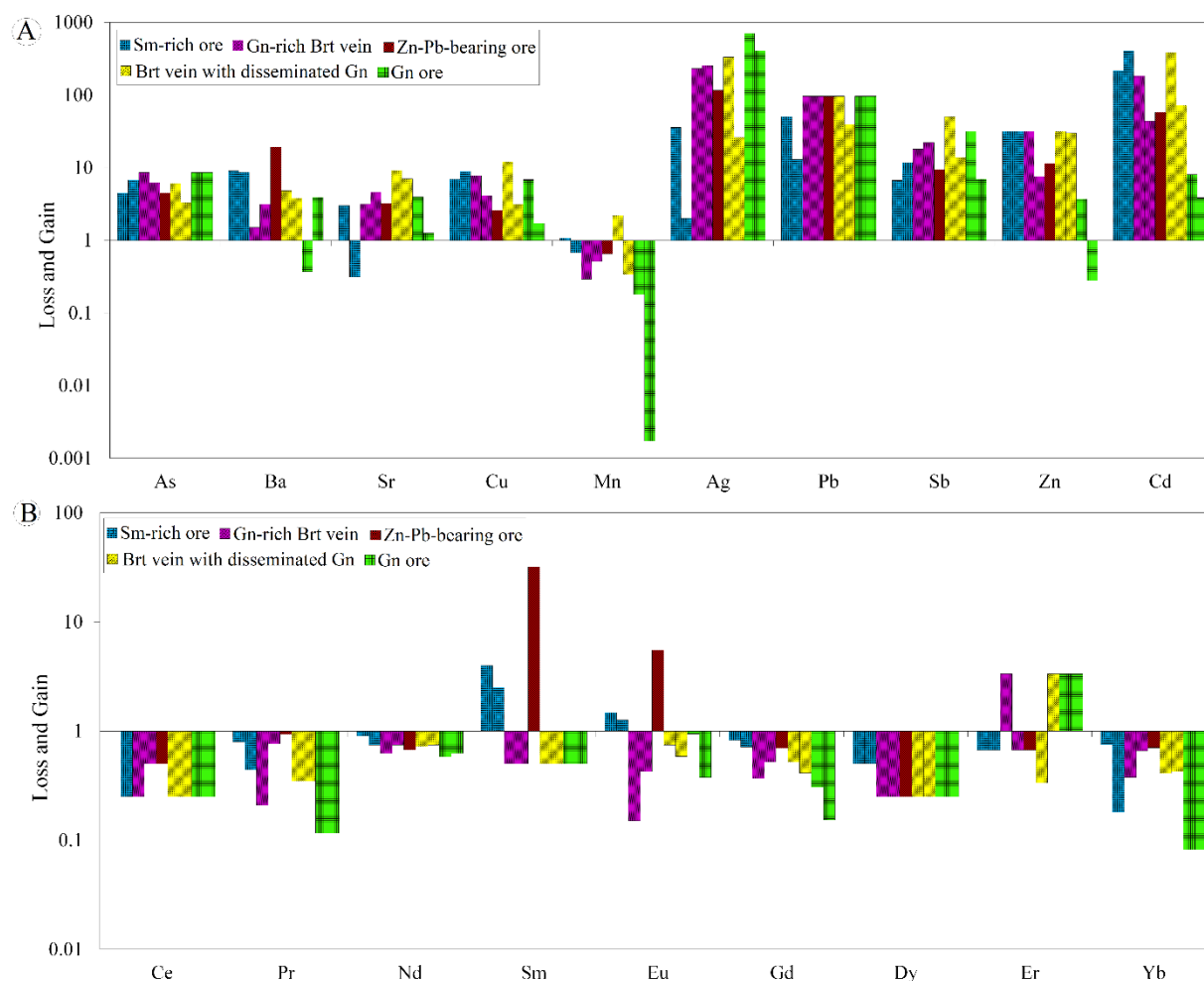


شکل ۹. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای سنگ آهک دگرسان‌شده (نمونه شماره T18، جدول ۱) در رخداد معدنی توزلو که نسبت به سنگ آهک سالم (نمونه شماره T23، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و **B:** نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای سنگ آهک دگرسان‌شده (نمونه شماره T18، جدول ۱) در رخداد معدنی توزلو که نسبت به سنگ آهک سالم (نمونه شماره T23، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 9. A: Loss and gain histogram of rare elements for the altered limestone (sample T18, Table 1) in the Tozλου occurrence that normalized against fresh limestone (sample T23, Table 1), and **B:** Loss and gain histogram of REE for the altered limestone (sample T18, Table 1) in the Tozλου occurrence that normalized against fresh limestone (sample T23, Table 1).

۱۱-A). نمونه‌های کانه‌دار نسبت به سنگ آهک دگرسان‌شده از عناصر کمیاب خاکی اریبیم و ایتربیم (برخی از نمونه‌های کانه‌دار از عنصر ایتربیم غنی شده‌اند) تهی‌شدگی نشان می‌دهند. تهی‌شدگی برای برخی از نمونه‌ها در عناصر پراسیودیمیم و گادولینیم نیز قابل مشاهده است (شکل ۱۱-B). بخش عمده عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۱-B).

مشابه با سنگ آهک سالم، نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با سنگ آهک دگرسان‌شده نیز تقریباً از همه عناصر کمیاب به جز منگنز (یکی از نمونه‌های مربوط به رگه باریتی با گالن دانه‌پراکنده از منگنز غنی شده است) غنی شده‌اند و تنها نمونه‌های مربوط به کانسنگ گالن از عناصر اریبیم و روی و یکی از نمونه‌های کانسنگ غنی از اسمیت‌زونیت از عناصر نقره و سرب تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل



شکل ۱۰. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توژلو که نسبت به سنگ آهک سالم (نمونه شماره T23، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توژلو که نسبت به سنگ آهک سالم (نمونه شماره T23، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

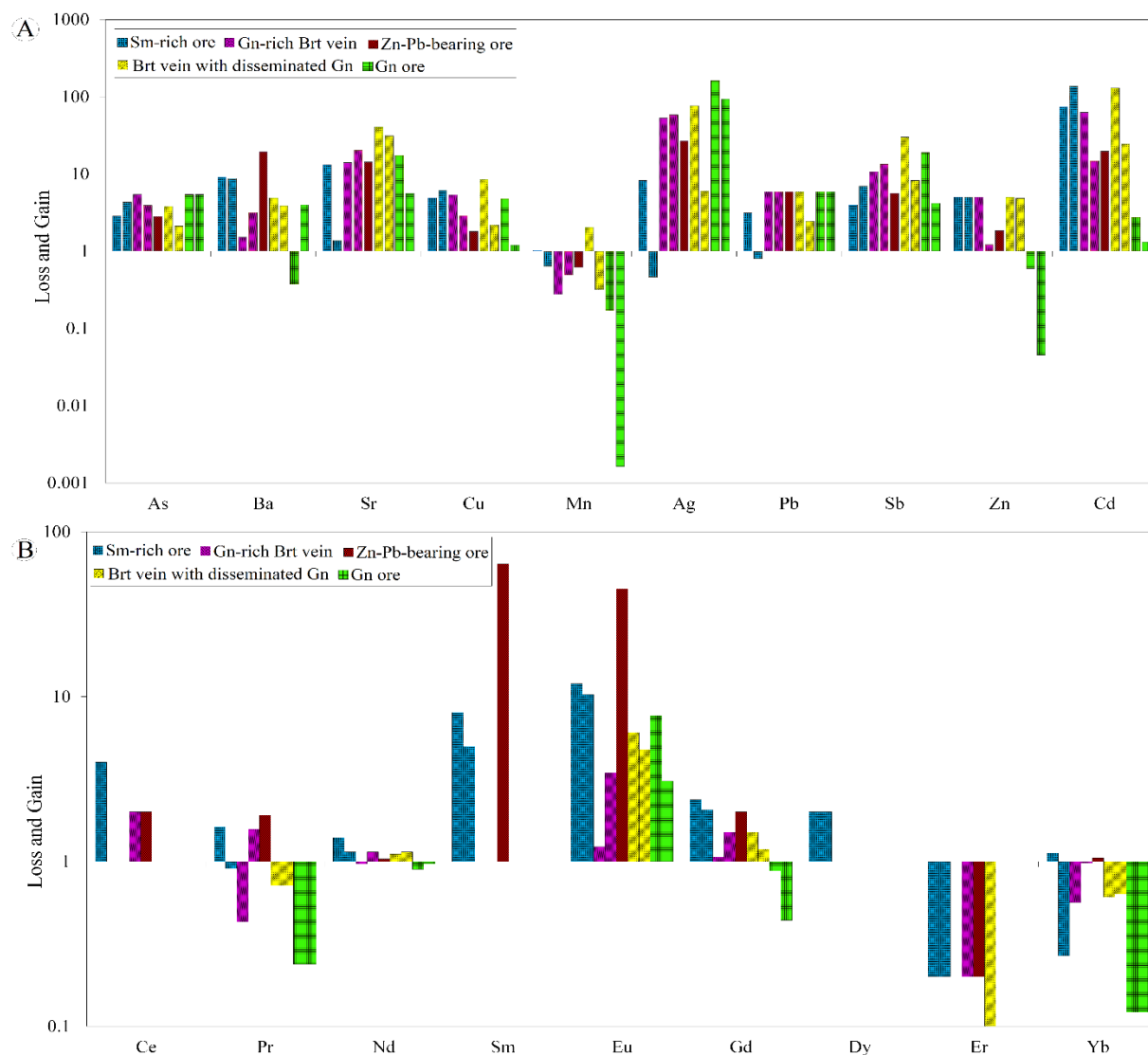
Fig. 10. A: Loss and gain histogram of rare elements for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against fresh limestone (sample T23, Table 1), and B: Loss and gain histogram of REE for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against fresh limestone (sample T23, Table 1).

جذب، تجزیه به اجزاء، تغییرات دما، فشار، pH، Eh، آلکالینیتی و تمرکز سیال است (Humphris, 1984; Lottermoser, 1992). در فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی، سیالات غنی از کلر، فلورور و دی اکسید کربن در نسبت‌های بالای سیال/سنگ، موجب تحرک عناصر کمیاب خاکی می‌شوند (Murphy and Hynes, 1986; Whitford et al., 1988; Bienvenu et al., 1990). این

در مقایسه با میانگین داده‌های پوسته قاره‌ای (Rudnick and Gao, 2003)، نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توژلو تقریباً در همه عناصر کمیاب غنی‌شدگی و در عناصر کمیاب خاکی، تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۲-A و B). معمولاً رفتار عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های کانه‌زایی و دگرسانی تحت تأثیر فرایندهایی مانند واکنش سیال-سنگ، نهشت سیال،

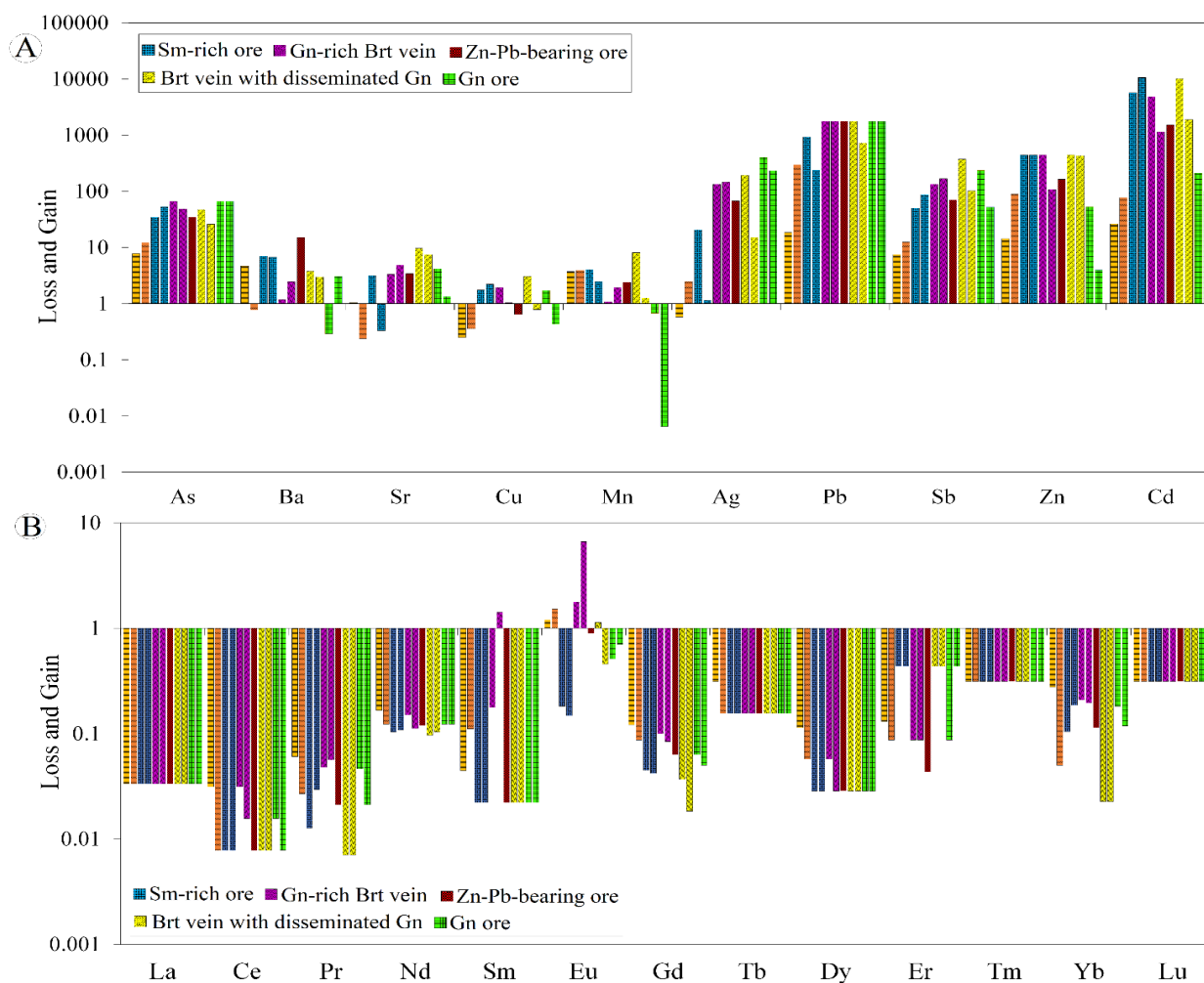
قاره‌ای در رخداد معدنی توزلو نشان می‌دهد که حجم و یا شیمی سیالات کانه‌ساز برای تحرک این عناصر در این کانسار کافی بوده است.

پژوهشگران معتقد هستند کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک، عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند. کاهش نسبی در مقادیر عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به سنگ آهک‌های میزبان سالم و دگرسان‌شده و میانگین داده‌های پوسته



شکل ۱۱. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توزلو که نسبت به سنگ آهک دگرسان‌شده (نمونه شماره T18، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توزلو که نسبت به سنگ آهک دگرسان‌شده (نمونه شماره T18، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 11. A: Loss and gain histogram of rare elements for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against altered limestone (sample T18, Table 1), and B: Loss and gain histogram of REE for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against altered limestone (sample T18, Table 1).



شکل ۱۲. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توژلو که نسبت به میانگین داده‌های پوسته قاره‌ای (Rudnick and Gao, 2003) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی توژلو که نسبت به میانگین داده‌های پوسته قاره‌ای (Rudnick and Gao, 2003) بهنجار شده‌اند.

Fig. 12. A: Loss and gain histogram of rare elements for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against average continental crust data (Rudnick and Gao, 2003), and B: Loss and gain histogram of REE for the mineralized samples in the Tozlu occurrence that normalized against average continental crust data (Rudnick and Gao, 2003).

نوع کانه‌زایی و الگوی تشکیل

رگه‌ای رخ داده است. ۲- دگرسانی‌های گرمایی در رخداد معدنی توژلو شامل کرنات‌زدایی، کرنات‌شدن، دولومیتی‌شدن و دگرسانی برونزاد است. ۳- کانه‌زایی در رخداد معدنی توژلو شامل مجموعه کانیایی پیریت، گالن و اسفالریت است که با مجموعه کانی‌های باطله کلسیت، باریت و کوارتز همراهی می‌شوند. ۴- ساخت و بافت‌های کانه‌زایی اپی‌ترمال مانند رگه-رگچه‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، پُرکننده

مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در رخداد معدنی توژلو با انواع کانسارهای رگه‌ای فلزهای پایه (و گران‌بها) نشان می‌دهد کانه‌زایی در این رخداد معدنی را می‌توان در دسته کانسارهای اپی‌ترمال قرار داد. مهم‌ترین شواهد این مقایسه عبارتند از: ۱- کانه‌زایی در رخداد معدنی توژلو به صورت

تشکیل توالی رسوبی ژوراسیک و کرتاسه آغاز شده و سپس با یک نبود رسوب گذاری تا ائوسن (Majidifard and Shafei, 2006)، با تشکیل توالی‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن، رسوبات تخریبی الیگوسن (سازند فرمز زیرین) و رسوبات آهکی و مارنی سازند قم به سن میوسن پیشین ادامه یافته است (شکل ۱۳-۱۳A). طی فرایندهای مربوط به فاز کوه‌زایی لارامید، توالی ژوراسیک متحمل دگرگونی ضعیف اسلیتی شده است (Majidifard and Shafei, 2006). در مرحله دوم، واحدهای سنگی منطقه تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی فاز کوه‌زایی پاسادین چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آنها تشکیل شده است. هم‌زمان با این فرایندها، توده نفوذی گرانودیوریتی تا دیوریتی تخت به سن میوسن (۱۶ میلیون سال، Haghghi Bardineh et al., 2017) در واحدهای سنگی ژوراسیک، کرتاسه و ائوسن نفوذ کرده است (شکل ۱۳-۱۳B). نفوذ این توده سبب تشکیل کانسارهای اسکارنی آهن درون واحدهای آهکی کرتاسه شده است (Mansouri et al., 2015). در مرحله سوم، توده‌های نیمه آتشفشانی داسیتی تا ریوداسیتی به سن بعد از میوسن (Majidifard and Shafei, 2006) به داخل واحدهای سنگی منطقه نفوذ کرده‌اند (شکل ۱۳-۱۳C). این توده‌ها به عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش سیالات جوی و توسعه پهنه‌های دگرسانی و کانه‌زایی شده‌اند. هرچند رخنمونی از توده‌های مزبور در منطقه توزلو دیده نمی‌شود؛ اما در منطقه گوموش تپه و گویجه‌یلاق که در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری شمال غرب رخداد معدنی توزلو واقع شده‌اند، توده‌های نیمه آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی عامل کانه‌زایی روی-سرب-مس (نقره) گوموش تپه (Salehi et al., 2015; Salehi et al., 2011) و سرب-روی (نقره) گویجه‌یلاق (Bagherpour et al., 2020) هستند. لذا شاید بتوان عملکرد سیالات گرمابی مشتق‌شده از بخش‌های عمقی توده‌های اسیدی مزبور را در تشکیل کانه‌زایی سرب و روی در رخداد معدنی توزلو مؤثر دانست. مرحله چهارم با بالاآمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۳-۱۳D).

فضای خالی، گل کلمی، کاکلی، جان‌سینی و بازماندی به خوبی در رخداد معدنی توزلو توسعه یافته است. ۵- همبستگی مثبت عناصر کانه‌ساز سرب، نقره، آرسنیک و آنتیموان بیشترین شباهت را با ذخایر اپی‌ترمال نشان می‌دهد.

مقایسه ویژگی‌های رخداد معدنی سرب و روی توزلو با انواع کانسارهای اپی‌ترمال و کانسارهای با سنگ میزبان رسوبی (نوع کارلین) نشان می‌دهد که هرچند این رخداد معدنی از نظر سنگ میزبان و برخی از دگرسانی‌های گرمابی با کانسارهای نوع کارلین مشابهت دارد؛ اما از دیدگاه کانی‌شناسی کانسنگ، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله، ساختارهای کنترل‌کننده کانه‌زایی، مقادیر سرب و روی و همبستگی عناصر کانه‌ساز به ویژه نقره، آرسنیک و آنتیموان، بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط (Hedenquist et al., 2000; Albinson et al., 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2003) دارد (جدول ۴). علاوه بر این، نتایج بررسی‌های اولیه ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع (نوع LV) در کانی‌باریت در رخداد معدنی توزلو که توسط بهره‌بردار معدن انجام شده است، دما و شوری سیالات کانه‌ساز را به ترتیب بین ۲۳۲ تا ۳۱۷ درجه سانتی‌گراد و ۵ تا ۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام مشخص کرده است. این نتایج نشان می‌دهد سیالات کانه‌ساز در این رخداد معدنی متعلق به یک سامانه $H_2O-NaCl$ با دمای متوسط تا بالا و شوری متوسط هستند. این محدوده دما و شوری از ویژگی‌های سیالات کانه‌ساز در کانسارهای اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بهای نوع سولفیداسیون حدواسط است (Albinson et al., 2001; John, 2001; Simmons et al., 2005). در جدول ۵، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی رخداد معدنی توزلو با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال در شمال غرب ایران مقایسه شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی و آزمایشگاهی، مراحل تکوین و تکامل رخداد معدنی توزلو را می‌توان به صورت یک توالی چهار مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۳). مرحله نخست، با

جدول ۴. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی توزلو با انواع کانسارهای اپی‌ترمال و کانسارهای با سنگ میزبان رسوبی (نوع کارلین)

Table 4. Comparison of main characteristics of the Tozlou occurrence with epithermal and sedimentary rock-hosted (Carlin-type) deposits

	Tozlou	Carlin	Epithermal		
			LS	IS	HS
Host rock	Limestone, Fm.	Carboniferous dolomitic limestone, siltstone, and shale with calcareous interlayers	Basalt-rhyolite	Andesite-rhyodacite	
Ore controls	Faults and fractures	Reverse and normal faults with steep dips	Extensional to strike-slip faults		Arc parallel faults, diatreme, hyd. breccias
Key ore minerals	Py, Gn, Sp	Diss. auriferous Py, Mrc, Apy, Orp, Rlq, Stb, Brt	Sp, Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Apy, Prg, Acn	Fe-poor Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Stb	Sp, Eng, Lzn, Fmt, Cv, Dg
Gangue minerals	Cal, Brt, Qz, Dol	Cal, Qz, Jsp	Qz, Adl, non-Mn bladed Cal, Brt, Clt, Fl	Qz, Mn Cal, Brt	Qz, Alu, Anh, Brt
Hydrothermal alteration	Decarbonization, carbonatization, dolomitization	Decarbonization, silicification, argillic, dolomitization	Argillic, silicification, carbonatization	Sericitization, intermediate, argillic, silicification, propylitic	Sericitization, advanced argillic, silicification, propylitic
Ore textures	Vein-veinlet, brecciated, vug infill, colloform, disseminated, cockade	Replacement, disseminated, vug infill	Vein-veinlet, colloform, comb, replacement, brecciated, bladed, crustiform	Vein-veinlet, comb, vug infill, crustiform, cockade	Vuggy Qz, vein-veinlet, cockade, vug infill, comb, brecciated, replacement
Metal signature	Pb, Zn (Ag, As, Sb, Ba)	Au (Ag, As, Sb, Hg, Tl, Ba, Zn, Pb, F)	Au, Ag (Zn, Pb, Cu, Mo, As, Sb, Hg)	Au, Ag, Pb, Zn, Cu (Mo, As, Sb)	Au, Ag, Cu, As, Sb (Zn, Pb, Bi, W, Mo, Sn, Hg)
Temperature and salinity	232-317 °C, 5-11 wt.% NaCl eq.	150-320 °C, <10 wt.% NaCl eq.	120-330 °C, <10 wt.% NaCl eq.	140-320 °C, 12-32 wt.% NaCl eq.	180-330 °C, 3-10 wt.% NaCl eq.
References	Daneshvar (2023), This study	Hofstra and Cline (2000)	White and Hedenquist (1990), Cooke and Simmons (2000), Hedenquist et al. (2000), Albinson et al. (2001), Sillitoe and Hedenquist, 2003, Gemell (2004), Simmons et al. (2005), Andreeva et al. (2013), Saunders et al. (2014), Wang et al. (2019)		

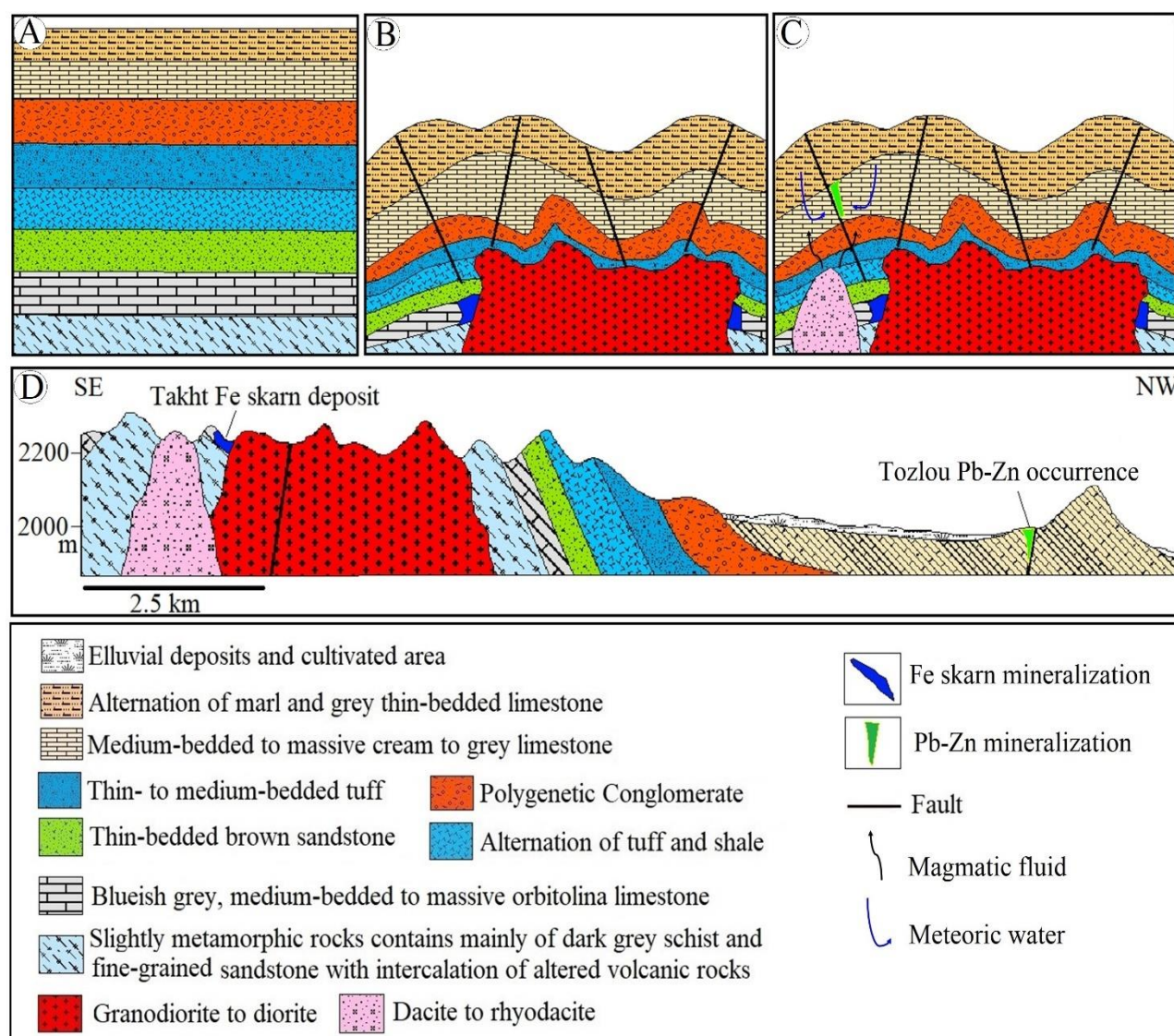
Abbreviations: Acn: acanthite, Adl: adularia, Alu: alunite, Anh: anhydrite, Apy: arsenopyrite, Brt: barite, Cal: calcite, Ccp: chalcopyrite, Clt: celestine, Cv: covellite, Dg: digenite, Dol: dolomite, Eng: enargite, Fl: fluorite, Fmt: famatinite, Gn: galena, HS: high-sulfidation, IS: intermediate-sulfidation, Jsp: jasperoid, LS: low-sulfidation, Lzn: luzonite, Mrc: marcasite, Orp: orpiment, Prg: pyrrargyrite, Py: pyrite, Rlq: realgar, Qz: quartz, Sp: sphalerite, Stb: stibnite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#).

جدول ۵. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی توژلو با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال در شمال‌باختر ایران

Table 5. Comparison of main characteristics of the Tozlou occurrence with some epithermal deposits in NW Iran

	Tozlou	Qarekand	Dagh-Daali		Ay Qalasi
			Pakhirbolaghi zone	Balderghani zone	
Host rock	Limestone, Qom Fm.	Limestone, shale	Jangotaran dolomitic limestone	Marl, sandstone, siltstone, and tuff units of Qom Fm.	Siltstone, sandstone, feldspar porphyry dyke
Ore controls	Faults and fractures	Faults and fractures	Faults and fractures		Normal faults and fractures
Key ore minerals	Py, Gn, Sp	Gn, Sp, Ccp, Py, Au	Py, Sp, Gn, Stb, Ccp	Sp, Gn, Rlg, Orp, Stb, Ccp	Py, Ccp, Sp, Gn, Tnt-Ttr
Gangue minerals	Cal, Brt, Qz, Dol	Qz, Ser, Brt	Qz, Cal, Brt	Qz, Brt, Cal	Qz, Ser-III, Alu, Jrs
Hydrothermal alteration	Decarbonization, carbonatization, dolomitization	Silicification, dolomitization, argillic	Argillic, silicification	Argillic, silicification, carbonatization	Silicification, phyllic, intermediate argillic
Ore textures	Vein-veinlet, brecciated, vug infill, colloform, disseminated, cockade	Brecciated, box work, bladed, crustiform, massive, comb, replacement	Vug infill, colloform, crustiform		Vein-veinlet, brecciated, vug infill, comb, crustiform, cockade
Metal signature	Pb, Zn (Ag, As, Sb, Ba)	Pb, Zn, Cu, Au	Zn, Pb (Sb)	Zn, Pb (As, Sb, Au)	Pb, Zn (Ag)
Temperature and salinity	232-317 °C, 5-11 wt.% NaCl eq.	80-220 °C, 6-13 wt.% NaCl eq.	174-260 °C, 4-7 wt.% NaCl eq.	145-234 °C, 2-11 wt.% NaCl eq.	238-391 °C, 9-21 wt.% NaCl eq.
Mineralization type	IS epithermal	LS epithermal	LS epithermal		IS epithermal
References	Daneshvar (2023), This study	Hassani Soughi et al. (2021)	Rahimsouri et al. (2018)		Shirkhani (2007), Mohammadi Niaei et al. (2015)

Abbreviations: Alu: alunite, Brt: barite, Cal: calcite, Ccp: chalcopyrite, Dol: dolomite, Gn: galena, HS: high-sulfidation, Ill: illite, IS: intermediate-sulfidation, Jrs: jarosite, LS: low-sulfidation, Orp: orpiment, Py: pyrite, Rlg: realgar, Qz: quartz, Ser: sericite, Sp: sphalerite, Stb: stibnite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010).



شکل ۱۳. تصویر شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی توزلو. A: تشکیل توالی‌های سنگی ژوراسیک، کرتاسه، ائوسن، سازند قرمز زیرین و سازند قم، B: چین خوردگی واحدهای سنگی منطقه در اثر تنش‌های زمین‌ساختی فاز کوه‌زایی پاسادین در میوسن و نفوذ توده‌های گرانودیوریتی تا دیوریتی به داخل واحدهای سنگی ژوراسیک، کرتاسه و ائوسن. نفوذ این توده‌ها سبب تشکیل کانسارهای اسکارنی آهن تخت درون واحدهای آهکی کرتاسه شده است، C: نفوذ توده‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی به سن پس از میوسن به داخل واحدهای سنگی منطقه. سیالات گرمایی مشتق شده از بخش‌های عمقی این توده‌های اسیدی سبب رخداد کانه‌زایی سرب و روی در منطقه شده است و D: بالا آمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش

Fig. 13. Schematic representation of mineralization evolution stages at Tozlou occurrence. A: Formation of Jurassic, Cretaceous, and Eocene rock units, Lower Red Formation, and Qom Formation, B: Folding of rock strata due to the tectonic stresses of the Pasadena orogenic phase in the Miocene and the intrusion of granodiorite to diorite plutons into the Jurassic, Cretaceous, and Eocene rock units. The intrusion of these plutons caused the formation of the Takht Fe skarn deposits in Cretaceous limestone units, C: The intrusion of post-Miocene dacite-rhyodacite subvolcanic domes within rock strata. Hydrothermal fluids derived from the deep parts of these acidic domes have caused Pb-Zn mineralization in the region, and D: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

(۱) رخداد معدنی توزلو هرچند از نظر سنگ میزبان و برخی از دگرسانی‌های گرمایی (کربنات‌زدایی و دولومیتی‌شدن) با کانسارهای نوع کارلین مشابه است؛ اما از دیدگاه کانی‌شناسی کانسنگ، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله (رگه-رگچه‌ای، برشی، گل‌کلمی، کاکلی)، ساختارهای کنترل‌کننده کانه‌زایی، مقادیر سرب و روی و همبستگی عناصر کانه‌ساز به ویژه نقره، آرسنیک و آنتیموان، بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط دارد. این نتیجه‌گیری با نتایج اولیه بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال که نشان‌دهنده دمای متوسط تا بالا (۲۳۲ تا ۳۱۷ درجه سانتی‌گراد) و شوری متوسط (۵ تا ۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای سیالات کانه‌ساز است، همخوانی دارد.

(۲) تشابه روند الگوی بهنجارشده عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار و سنگ آهک‌های سالم و دگرسان‌شده بیانگر نقش عمده سنگ‌های میزبان در تمرکز عناصر کانه‌ساز است. تشابه این الگو برای نمونه‌های کانه‌دار مختلف نشان‌دهنده تشکیل آنها از یک سامانه کانه‌زایی است.

(۳) بررسی نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در رخداد معدنی توزلو نشان‌دهنده تمرکز عناصر کانه‌ساز (مانند مس، سرب، روی، نقره، آرسنیک، آنتیموان، باریم، استرانسیم و کادمیم) در

بخش‌های کانه‌دار است. از طرف دیگر، تهی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های کانه‌دار بیانگر تحرک این عناصر توسط سیالات کانه‌زا طی واکنش‌های سیال-سنگ است.

(۴) ارتباط فضایی نزدیک توده‌های نیمه آتشفشانی داسیتی تا ریوداسیتی (سن بعد از میوسن) با کانسارهای گوموش‌تپه و گویجه‌یلاق (در مجاورت با منطقه مورد بررسی) بیانگر نقش این توده‌ها در تأمین حرارت برای چرخش سیالات و احتمالاً منشأ عناصر کانه‌ساز و سیالات گرمایی برای کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه (نقره) در این مناطق است. لذا بررسی مناطقی که مورد هجوم توده‌های نیمه آتشفشانی داسیتی تا ریوداسیتی قرار گرفته است (جدای از نوع سنگ میزبان) می‌تواند از نظر اکتشاف این نوع از کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال حائز اهمیت باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر می‌نمایند.

References

- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 1–32. <https://doi.org/10.5382/SP.08.01>
- Andreeva, E., Matsueda, H., Okrugin, V.M., Takahashi, R. and One, S., 2013. Au-Ag-Te mineralization of the low-sulfidation epithermal Aginskoe deposit, Central Kamchatka, Russia. *Resource Geology*, 63(4): 337–349. <https://doi.org/10.1111/rge.12013>
- Bagherpour, H., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., Nabatian, Gh. and Mehdikhani, B., 2020. Intermediate-sulfidation style of epithermal base metal (Ag) mineralization at the Qoyjeh Yeylaq deposit, SW Zanjan, Iran. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 545–564 (in Persian with extended English abstract). <https://doi.org/10.22067/econg.v11i4.71615>
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M. and Dmitriev, L. 1990. MORB alteration: Rare earth element/non-rare hydromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1–14. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90070-N](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90070-N)
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton. pp. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>
- Daneshvar, H., 2023. Geology, geochemistry, and genesis of the Tozlou Zn-Pb occurrence, south of Zanjan. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 70 pp. (in Persian with English abstract)
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 285–313. <https://doi.org/10.5382/SP.10.15>
- Gemmell, J. B., 2004. Low- and intermediate-sulfidation epithermal deposits. In: D.R. Cooke, C.L. Deyel and J. Pongratz (Editors), *24 Ct Gold Workshop*. University of Tasmania, Hobart, Australia, pp. 57–63. Retrieved August 16, 2023, from https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=40250&shelfbrowse_itemnumber=40250
- Haghighi Bardineh, S.N., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H. and Ahmadi Khalaji, A., 2017. Geochemical, Sr-Nd isotopic investigations and U-Pb zircon chronology of the Takht granodiorite, west Iran: Evidence for post-collisional magmatism in the northern part of the Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage. *Journal of African Earth Sciences*, 139: 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.030>
- Hassani Soughi, F., Calagari, A.A. and Sohrabi, G., 2021. Consideration of mineralization and characterization of fluid inclusions in the Gharehkand sediment-hosted gold-bearing vein-veinlets, southeast of Maragheh, East Azarbaijan. *Journal of Economic Geology*, 13(2): 387–409. (in Persian with extended English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i2.87317>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- 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*. Society of Economic Geologists, Littleton. pp. 163–220. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.05>
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (Editor), *Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 317–342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50014-9>
- John, D.A., 2001. Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, western USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology* 96(8): 1827–1853. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827>
- Johnston, M.K., 2003. Geology of the Cove Mine, Lander County, Nevada, and a genetic model for the McCoy-Cove magmatic-hydrothermal system. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Nevada, Reno, Nevada, USA, 353 pp.

- Kuehn, C.A. and Rose, A.R., 1992. Geology and geochemistry of wall-rock alteration at the Carlin gold deposit, Nevada. *Economic Geology*, 87(7): 1697–1721. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.7.1697>
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7(1): 25–41. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(92\)90017-F](https://doi.org/10.1016/0169-1368(92)90017-F)
- Majidifard, M.R. and Shafei, A., 2006. Geological map of Marzban, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Mansouri, S., Aliani, F., Maanijou, M., Sepahi Gerow, A.A. and Mostaghimi, M., 2015. Mineralogy and geochemistry of granitoids and associated iron skarn of Takht (north of Kaboodar Ahang). *Journal of Petrology*, 21: 157–176. (in Persian with English abstract) Retrieved April 24, 2023, from https://ijp.ui.ac.ir/article_16197_5c6b8fe4ee86f4b580496929cfce37f9.pdf
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mohammadi, E., Hasan-zadeh-Dastgerdi, M., Ghaedi, M., Dehghan, R., Safari, A., Vaziri-Moghaddam, H., Baizidi, Ch., Vaziri, M.R. and Sfidari, E., 2013. The Tethyan Seaway Iranian Plate Oligo-Miocene deposits (the Qom Formation): distribution of Rupelian (Early Oligocene) and evaporate deposits as evidences for timing and trending of opening and closure of the Tethyan Seaway. *Carbonates and Evaporites*, 28(3): 321–345. <https://doi.org/10.1007/s13146-012-0120-7>
- Mohammadi Niaei, R., Daliran, F., Nezafati, N., Ghorbani, M., Sheikh Zakariaei, J. and Kouhestani, H., 2015. The Ay Qalasi deposit: An epithermal Pb-Zn (Ag) mineralization in the Urumieh–Dokhtar volcanic belt of northwestern Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 192(3): 263–74. <https://doi.org/10.1127/njma/2015/0284>
- Murphy, J.B. and Hynes, A.J., 1986. Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb and Y in two meta-basaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(8): 1138–1144. <https://doi.org/10.1139/e86-112>
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Berlin, 1250 pp. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- Rahimsouri, Y., Mehrabi, B. and Alipour, Sh., 2018. Mineralogy, geochemistry and fluid inclusion studies of Dagh-Daali Zn-Pb (\pm Au) deposit (northern Takab, northwest Iran). *Journal of Petrology*, 9(3): 217–244. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2019.114335.1110>
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors) *Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, England, pp. 1–64. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2011. Mineralogy and geochemistry of rare earth elements in Qomish Tappeh Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, southwest of Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 2(2): 235–254. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V2I2.7853>
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2015. Epithermal base metal-silver mineralization at Qomish Tappeh deposit, southwest of Zanjan. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(97): 329–346. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2015.41519>
- Saunders, J.A., Hofstra, A.H., Goldfarb, R.J. and Reed, M.H., 2014. Geochemistry of hydrothermal gold deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors) *Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, England, pp. 33–424. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01117-7>
- Shirkhani, M., 2007. Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Pb-Zn deposit, SE Takab. Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 143 pp. (in Persian with English abstract)
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcano-tectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth*. *Economic Geology Special Publication 10*, Littleton, pp. 315–343. Retrieved April 24, 2023, from <https://www.researchgate.net/publication/285488888>
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors),

- One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Theodore, T.G., Kotlyar, B.B., Berger, V.I., Moring, B.C. and Singer, D.A., 2000. Implications of stream-sediment geochemistry in the northern Carlin trend, Nevada. U.S. Geological Survey, Menlo Park, Report 94025, 45 pp.
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.Y. and Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 36(1–3): 445–474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68(1–2): 105–119. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90090-3)
- 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>