



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/ECONG.2023.81591.1071



Metallogeny of Manto-copper deposits, special view in Nasim copper deposit, northwest of Bardaskan, Khorasan Razavi

Touran Ramezaniabbakhsh¹, Mohammad Hassan Karimpour^{2*} , Hossein Azizi³, Behnam Rahimi⁴ , Saeed Saadat⁵ 

¹ Ph.D. student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Professor, Department of Mining, Faculty of Technical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

⁴ Professor, Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Petroleum Engineering and Geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 March 2023

Revised: 29 April 2023

Accepted: 01 May 2023

Keywords

Chalcocite

Andesite

Nasim mine

Bardaskan

Oryan region

Sabzevar subzone

*Corresponding author

Mohammad Hassan Karimpour

✉ karimpur@um.ac.ir

ABSTRACT

The most important Manto-type deposits are located in the Coastal and Central Cordillera, northern Chile. Manto-type copper deposits have been reported in Iran in Saveh-Jiroft zone, the volcanoes of eastern Iran, the volcanic-intrusive complex of Alborz-Azerbaijan, Sabzevar zone, and Sanandaj-Sirjan zone. Nasim copper deposit is located in the northwest of Bardaskan, northeastern Iran. The deposit is part of the Iranian Plateau, Sabzevar Subzone, and Oryan region, located at the end part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt. The geological units in the area include the Late Tertiary (Paleocene-Eocene), volcanic rocks, and sedimentary rocks including conglomerate and limestone. In Nasim deposit, mineralization has been done in conglomerate unit as a particular horizon. This unit is composed of volcanic fragments with carbonate and volcanic cements. Chalcocite is the most important and main sulphide mineral in the study area. Alteration can be divided into pre-mineralization and syn-mineralization stages. Pre-mineralization includes Celadonite, Carbonate, Silicified, and Propylitic alteration. Syn-mineralization consists of small amounts of Chlorite, Zeolite, and Calcite. In this system, the chemistry of solution is different from those of other systems such as IOCG, massive sulfide, porphyry etc., due to completely reduced and iron and silica-deficient solution.

How to cite this article

Ramezaniabbakhsh, T., Karimpour, M.H., Azizi, H., Rahimi, R. and Saadat, S., 2023. Metallogeny of Manto copper deposits, special view in the Nasim copper deposit, northwest of Bardaskan, Razavi Khorasan. *Journal of Economic Geology*, 15(1): 143–174. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.81591.1071>



©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

Nasim deposit is located in northeastern Iran, 50 kilometers northwest of Bardaskan. The study area is part of the Iranian Plateau, Sabzevar subzone, and Oryan region, which is located in the end part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt. The most important Manto-type deposits of Iran are located in Bardaskan region. The study area includes Paleocene-Eocene volcanic rocks, major volcanic and minor intrusive fragments. In this study, the chemistry of solution was investigated based on alteration and paragenesis in Bardaskan region.

Material and Methods

This study was done in two parts: field studies and laboratory works. Sampling and structural studies were done while doing field studies. Logging drill cores was done for about 1000 meters in 20 boreholes. After field work, a total of 150 thin sections and 50 polished sections were prepared and studied to investigate petrography and mineralogy and to prepare geological map.

Discussion and Results

Geology of the area includes sequence of volcanic rocks of basalt, basaltic-andesite and andesite, respectively, formed in a non-marine environment. Conglomerate and limestone units formed after volcanic activity. Mineralization occurred only within the conglomerate unit due to useful porosity. Mineralization formed clearly post-dates conglomerate and limestone in the region. Chalcocite is the most important primary copper mineral in Manto Chalcocite systems, which has a high amount of copper and lacks iron. Mainly in the conglomerate unit, due to the good porosity of the conglomerate, the solution has risen up through the faults and penetrated into the conglomerate. Limited mineralization is observed in the carbonate rock. The mineralizations have no time and origin relationship with the volcanic cycle and the time of conglomerate formation. The porosity in the conglomerate and the fault structure in the region have played an important role in the mineralization.

Manto copper solution is a solution poor in iron and poor in silica, and it is completely reducing. This solution cannot react with lime under any conditions; so the mineralization rate is very low in lime, and this shows that the solution has a special chemistry.

Some exploration consultants have used the word agglomerate instead of conglomerate in Bardaskan. This is not acceptable because agglomerate is created during volcanic activity and its fragments consist of only one type of composition and have a rounded state (volcanic bomb). But conglomerate is formed during the erosion cycle and all the pieces are rounded when transported by river water or on the seashore. The use of the term agglomerate becomes a fundamental problem regarding the time and manner of formation of copper mineralization. Not knowing the exact time of Qata mineralization challenges the exploration.

Alteration assemblage do not consist of epidote and quartz due to the lack of iron and silica in the solution. Moreover, the reducing solution is due to the presence of organic substances. Some researchers (e.g., [Wilson and Zentilli, 2006](#); [Tosdal and Munizaga, 2003](#)) suggest a volcanic origin for Manto-type deposits. The volcanic rocks contain at least 5% primary magnetite. If the rocks are the origin, the solution will be rich in iron, but there is no evidence of iron-bearing minerals such as chalcopyrite and pyrite in the area.

Other researchers (e.g., [Palacios, 1986](#); [Oliveros et al., 2008](#)) see intrusive rocks as the origin of these deposits. If the rocks are the origin, solution will be definitely rich in silica, iron, and aluminum, but there is no evidence of quartz-chalcocite mineral assemblage. Therefore, the determination of the origin of the deposits requires further studies and consideration of other factors.

Acknowledgments

We would like to thank Ferdowsi University of Mashhad and Kome Madan Pars Company for cooperating and supporting this research. We thanks the reviewers and editor(s) for their thoughtful contributions.



متالوژنی کانسارهای مس مانتو با نگاهی ویژه به کانسار مس نسیم، شمال غرب بردسکن، خراسان رضوی

توران رمضانی آبیخش^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۲*}، حسین عزیزی^۳، بهنام رحیمی^۴، سعید سعادت^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استاد، گروه معدن دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۴ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۵ دانشیار، گروه مهندسی نفت و زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
مهم‌ترین کانسارهای نوع مانتو در ناحیه کردیلرای ساحلی و کردیلرای مرکزی در شمال شیلی واقع شده‌اند. در ایران، کانسارهای مس نوع مانتو در زون ساوه-جیرفت، آتشفشان‌های شرق ایران، مجموعه آتشفشانی-نفوذی البرز-آذربایجان، ناحیه سبزوار و زون سنندج-سیرجان گزارش شده‌اند که نشان‌دهنده وجود توانایی قابل توجه از این نوع کانسار است. محدوده معدنی مس نسیم در شمال شرق ایران و در شمال غرب شهرستان بردسکن واقع شده است. این کانسار بخشی از صفحه ایران مرکزی و قسمتی از زیرپهنه سبزوار و منطقه اوریان است. واحدهای زمین‌شناسی رخنمون‌یافته در مناطق مورد بررسی شامل سنگ‌های آتشفشانی اواخر ترشیری (پالئوسن-ائوسن) و سنگ‌های رسوبی از جمله کنگلومرا و سنگ آهک است. در کانسار مس نسیم، کانی‌سازی در یک افق خاص که واحد کنگلومراست، ایجاد شده است. کنگلومرا از قطعه‌های آتشفشانی و سیمان کربناته و آتشفشانی تشکیل شده است. مهم‌ترین و اصلی‌ترین کانی سولفیدی موجود در منطقه مورد بررسی، کالکوسیت است. دگرسانی در محدوده نسیم به دو دسته تقسیم می‌شود: (۱) قبل از کانی‌سازی (۲) هم‌زمان با کانی‌سازی. دگرسانی قبل از کانی‌سازی شامل سلادونیت، کربناتی، سیلیسی و پروپیلیتیک ناحیه‌ای است و در نوع دوم که هم‌زمان با کانی‌سازی است، مقدار جزئی کلریت، زئولیت و کلسیت ایجاد شده است. در این سامانه محلول دارای شیمی متفاوتی نسبت به سامانه‌های کانی‌سازی دیگر مانند IOCG و ماسیوسولفید، پورفیری و ... است؛ زیرا در این کانسار محلول کاملاً آحیایی و فقیر از آهن و سیلیس است.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱</p> <p>واژه‌های کلیدی</p> <p>کالکوسیت</p> <p>آندزیت</p> <p>معدن نسیم</p> <p>بردسکن</p> <p>منطقه اوریان</p> <p>زیرپهنه سبزوار</p> <p>نویسنده مسئول</p> <p>محمدحسن کریم‌پور</p> <p>karimpur@um.ac.ir ✉</p>

استناد به این مقاله

رمضانی آبیخش، توران؛ کریم‌پور، محمدحسن؛ عزیزی، حسین؛ رحیمی، بهنام و سعادت، سعید، ۱۴۰۲. متالوژنی کانسارهای مس مانتو با نگاهی ویژه به کانسار مس نسیم، شمال غرب بردسکن، خراسان رضوی، ۱۵(۱): ۱۴۳-۱۷۴. <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.81591.1071>

مقدمه

واژه نوع مانتو^۱ واژه‌ای است که نخستین بار در شیلی (Ruiz et al., 1971) و برای ذخایر مس چینه‌کران با میزبان آتشفشانی استفاده شده است. این نوع کانسار با عیار نسبتاً بالا (تا بیش از ۸ درصد وزنی مس)، یکی از انواع مهم ذخایر مس در جهان است (Wilson and Zentilli, 1999). بعدها بررسی‌های زیادی توسط پژوهشگران بر روی این نوع از کانسارهای مس انجام شد. ساتو (Sato, 1984)، کانسارهای مس مانتو را به سه نوع چینه‌کران^۲ مانند ذخایر تالکونا^۳ و سرانگرو^۴، انباشته شده روی هم^۵ مانند ذخایر بوئنا اسپرانزا^۶ و لاینس استفانیا^۷ و نوع چینه‌سان مانند ذخایر مانتوس بلانکوس^۸ و ال سولدادو^۹ تقسیم‌بندی کرده است.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. مشاهدات صحرایی، بررسی مقاطع نازک و صیقلی، تجزیه شیمیایی و تعبیر و تفسیر داده‌ها در محدوده‌ای به وسعت ۴۴ کیلومتر مربع انجام شد.

عملیات صحرایی شامل پیمایش و پی‌جویی سطحی منطقه، نمونه‌برداری و تمایز واحدهای سنگی و عوارض مهم زمین‌شناسی بر مبنای تصویر ماهواره planet SAS است. تعداد ۱۵۰ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی و تهیه نقشه زمین‌شناسی و همچنین ۵۰ مقطع صیقلی از مغزه‌های حفاری (بررسی ۱۰۰۰ متر مغزه حفاری مربوط به ۲۰ حلقه چاه حفاری) و رخنمون‌های سطحی، برای بررسی کانی‌سازی در منطقه، تهیه و بررسی شد.

بر اساس حدود ۷۰۰۰۰ متر حفاری انجام شده در محدوده معدنی نسیم، ۲۰ گمانه مناسب و معرف انتخاب شد و مورد بررسی قرار گرفت (انتخاب گمانه‌ها بر اساس فاصله‌های مکانی مناسب و با استفاده از داده‌های زمین‌شیمیایی موجود در منطقه مورد بررسی و تغییرات عیاری بوده است).

ویژگی کانسارهای مس مانتو در جهان

مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین کانسارهای نوع مانتو در ناحیه کردیلرای ساحلی^{۱۰} و کردیلرای مرکزی (نواحی تالکونا و اوچومی^{۱۱}) در شمال شیلی واقع شده‌اند و کمربند فلززایی بزرگی را با میزان مس قابل توجهی ایجاد کرده‌اند (Wilson and Zentilli, 2006; Kojima et al., 2009). علاوه بر کانسارهای شیلی، انواع مشابهی از ذخایر در شمال غربی کانادا به نام لایه قرمز آتشفشانی^{۱۲} و منطقه میشیگان شمالی به نام ذخایر کنای^{۱۳} با همین ویژگی‌ها معرفی شده‌اند (Cabral and Beaudoin, 2007).

زمین‌شناسی

کوجیما و همکاران (Kojima et al., 2009) با بررسی الگوی ژنتیکی کانسارهای شمال شیلی بیان کرده‌اند که این کانسارها از نظر زمین‌شناسی به دو دسته محدوده‌های شمالی و محدوده‌های مرکزی تقسیم شده‌اند: (۱) کانسارهای محدوده‌های شمالی، در محدوده ساحلی از توده‌های آتشفشانی-رسوبی و آندزیت با سن ژوراسیک و توده‌های نفوذی جوان‌تر تشکیل می‌شود. زمین‌شناسی محدوده‌های شمالی شامل سنگ‌های آتشفشانی از جمله آندزیت بازالت، آندزیت همراه با رسوب‌های زیر دریایی با سن ژوراسیک (آلنین-آکسفوردین) است.

(۲) کانسارهای محدوده مرکزی بیشتر شامل توالی‌های رسوبی آتشفشان کرتاسه زیرین (اغلب نئوکامین)، ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ توفی و سنگ آهک است.

سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ژوراسیک بالایی یا کرتاسه پایینی میزبان کانی‌سازی هستند. در نخستین گروه در شمال شیلی مانند مانتوس بلانکوس و لاینس استفانیا، میچیل^{۱۴}، بوئنا اسپرانزا، سنگ میزبان سازند لانگرا^{۱۵} (یک توالی آتشفشانی با ضخامت ۷۰۰۰ متر) به سن ژوراسیک است. در دومین گروه از ذخایر واقع در مرکز شیلی (اوچومی، ال سولدادو، تالکونا)، سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی آتشفشانی

پاراژنز

در گونه‌های معدنی مس موجود در کانسارهای شیلی، تفاوت‌های خاصی در نواحی مربوط به کانی‌سازی دیده می‌شود. کالکوسیت (دیژنیت) - بورنیت در نواحی شمالی غالب است؛ اما کالکوپیریت به عنوان کانی اصلی در نواحی مرکزی تشکیل شده است (Kojima et al., 2009) (با توجه به این که کانی کالکوسیت شاخص نوع مانتو است، در مورد کالکوپیریت در قسمت نتیجه گیری مطالبی ارائه شده است). علاوه بر کانی‌های ذکر شده، مقادیر کمتری از پیریت، مس طبیعی، نقره طبیعی، تتراهدريت-تنانتیت، گالن، اسفالریت، مگنتیت و همتایت به صورت پراکنده، به عنوان کانی‌های اولیه مشاهده می‌شود (Camus, 1990; Oyarzun et al., 1998; Kojima et al., 2003; Ramírez et al., 2006) (حضور پیریت و کالکوپیریت در کانسارهای نوع مانتو نمی‌تواند به عنوان پاراژنز کالکوسیت باشد که این مورد در قسمت نتیجه گیری مورد بررسی قرار گرفته است).

در کانسار مس بولتو، کانی اصلی، کالکوسیت به صورت جریانی در ماسه‌سنگ توفی همراه با کالکوپیریت، بورنیت، کولیت و مس طبیعی است. گانگ‌ها شامل مونتموریونیت، اکسیدهای منگنز و آهن، گچ، کلسیت، کلسدونی و جاسپر هستند. کانی‌های مس اکسید شده، سیلیکات‌ها و کربنات‌ها هستند (Nishihara, 1957).

کانسار لورنا شامل مجموعه کانی‌های کالکوسیت - بورنیت با مقدار کمی کالکوپیریت، پیریت و دیژنیت، کولیت، کریزو کلا و مالاکیت است (Herazo et al., 2020). (تشکیل پیریت و کالکوپیریت در این نوع کانسارها در قسمت نتیجه گیری توضیح داده شده است).

موقعیت کانی‌سازی

در بزرگ‌ترین ذخایر مس نوع مانتو در ساحل کوردیلرای مرکزی شیلی، ریوداسیت - بازالت با سن کرتاسه زیرین، میزبان کانی‌سازی است.

کرتاسه زیرین میزبان کانی‌سازی هستند (Zentilli et al., 1997; Wilson and Zentilli 1999; Kojima et al., 2009).

در منطقه ال سولدادو زمین‌شناسی شامل سندستون، سیلتستون، شیل و به سمت بالا بازالت و ریوداسیت و در سطح آندزیت و برش آندزیتی است. عضو بالایی متشکل از سنگ‌های آتشفشانی (بازالت - ریوداسیت) و عضو پایینی متشکل از شیل‌های دریایی غنی از مواد آلی و ماسه سنگ‌های آتشفشانی است (Klohn et al., 2002; Boric et al., 1990). کانی‌سازی در سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی آتشفشانی کرتاسه زیرین و بیشتر در ریوداسیت که بین دو واحد بازالت قرار گرفته، تشکیل شده است (Wilson et al., 2003).

کانسار مس بولتو^{۱۶} در ساحل شرقی شبه جزیره باخا کالیفرنیا در کشور مکزیک قرار دارد. سازند پلیوسن زیرین بر روی یک سطح فرسایشی بر روی سنگ‌های آتشفشانی با سن میوسن که از آندزیت و جریان‌های بازالتی، توف، برش، آگلومرا، کنگلومرای آتشفشانی و ماسه‌سنگ توفی تشکیل شده، قرار گرفته است. پلیوسن از کنگلومرای بیسال^{۱۷}، سنگ آهک و ماسه‌سنگ توفی، در پنج سری متمایز و متوالی تشکیل شده است. پلیوسن زیرین توسط پلیوسن میانی و پلیوسن پسین پوشیده شده است. کانسار مس در هر توالی رسوبی به طور مستقیم بالای کنگلومرای با سن پلیوسن زیرین تشکیل شده‌اند (Nishihara, 1957).

در کانسار لورنا^{۱۸} واقع در شمال شیلی - آندره، سنگ‌های آتشفشانی ژوراسیک در قسمت جنوب غربی منطقه مورد بررسی وجود دارد.

چندین دایک مافیک تا فلسیک با سن ژوراسیک زیرین تا کرتاسه زیرین در سنگ‌های رسوبی قدیمی تر پالئوزوئیک و سنگ‌های رسوبی دریایی ژوراسیک اولیه نفوذ کرده‌اند که ترکیب آنها از گابرو تا دیوریت و کمتر گرانودیوریت است و سنگ‌های آندزیتی بازالتی تا آندزیتی، میزبان کانی‌سازی مس هستند (Herazo et al., 2020).

(Herazo et al., 2020). کانی‌های ثانویه در کانسار مس ال سولدادو کلریت - کلسیت و پتاسیم - فلدسپات (میکروکلین - ارتوکلاز) و کمتر کوارتز، اپیدوت، تیتانیت، روتیل، مسکویت و خاک رس (مونتموریلونیت) است (Wilson et al., 2003). در کانسار لورنا دگرسانی هیدروترمال با تغییر سدیک انتخابی پلاژیوکلاز، متاسوماتیسم کلسیم ضعیف و هماتیت فراوان نشان داده می‌شود. نوع دگرسانی گرمایی غالب در کانسار آلپینی شدن با اپیدوت جزئی، سریسیت، کلریت و کلسیت فراوان شناخته شد (Herazo et al., 2020) (با توجه به شیمی محلول در کانسارهای نوع مانتو، دگرسانی اپیدوتی و سیلیسی نمی‌تواند در ارتباط با این نوع باشد و این دگرسانی در ارتباط با قبل یا بعد از کانی‌سازی است که در قسمت نتیجه‌گیری توضیح داده شده است).

نظریه‌های مربوط به منشأ و الگوی تشکیل کانسار

برای تشکیل کانسارهای نوع مانتو سه نظریه اساسی وجود دارد: (۱) به شکل هم‌زمان با فعالیت آتشفشانی و سین‌ژنتیک (Ruiz et al., 1971; Sato, 1984; Tosdal and Munizaga, 2003)، (۲) در اثر عملکرد توده نفوذی و سیالات مشتق از آن به صورت اپی‌ژنتیک (Palacios, 1986; Oliveros et al., 2008)؛ (۳) شست‌وشوی مس از واحدهای آتشفشانی دارای مس به صورت اپی‌ژنتیک (Wilson et al., 2003; Tosdal and Munizaga, 2006).

تئوری سین‌ژنتیک بودن ذخایر نوع مانتو: حضور دانه‌های پراکنده و مجزای سولفیدی مس و همچنین نبود کانی‌های باطله در سنگ میزبان آندزیتی نشان‌دهنده تئوری ذکر شده برای تمامی کانسارهای نوع مانتو است. کانی‌سازی مس به صورت پراکنده در افق‌های رسوبی، در واقع بیانگر غنی‌شدگی مس در این افق‌هاست و بخارات متصاعد شده آتشفشانی مس‌دار پیشنهاد شده است؛ اما بر اساس اطلاعات و نتایج ارائه‌شده توسط کوچیما و همکاران (Kojima et al., 2009)، کانی‌سازی‌های اولیه اغلب جوان‌تر از

به نظر می‌رسد که توالی آتشفشانی بازالت-ریوداسیت بایمودال در یک محیط کمان‌قاره‌ای ایجاد شده است (Klohn et al., 1990; Boric et al., 2002).

در ال سولدادو کانی‌سازی بیشتر در ریوداسیت که بین دو واحد بازالت قرار گرفته، تشکیل شده است و همچنین کانی‌سازی در داخل و اطراف گسل‌ها بیشتر به شکل بورنیت و کالکوسیت ایجاد شده است (Wilson et al., 2003). ساتو (Sato, 1984) نیز معتقد است که بیشتر نهشته‌های شمال شیلی در توالی‌های آتشفشانی-رسوبی ژوراسیک - کرتاسه زیرین رخ داده‌اند.

در کانسار مس بولثو، کانی اصلی کالکوسیت است که به صورت پراکنده در ماسه سنگ توفی تشکیل شده است (Nishihara, 1957).

در کانسار لورنا سنگ‌های آندزیتی بازالتی تا آندزیتی میزبان کانی‌سازی مس هستند که به صورت بافت‌های آمیگدال و آفانیتیک تشکیل شده‌اند. ماتریکس اغلب از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن و مگنتیت پراکنده تشکیل شده است. مرحله قبل کانی‌سازی با حضور مگنتیت و پیریت با هماتیت جزئی مشخص می‌شود. در این حالت، در شکستگی‌ها کالکوپیریت جایگزین پیریت شده است. مرحله کانسنگ اصلی مس با مجموعه‌های بورنیت-کالکوسیت با بافت میرمیکت مشخص می‌شود.

در این منطقه سولفید مس غالب است و به صورت پراکنده و پرکننده شکستگی‌ها ظاهر می‌شود و همچنین ارتباط نزدیکی با پیروبیتومن دارد. کالکوسیت همچنین در پر کردن رگه‌ها و درون آمیگدال‌های سنگ میزبان آتشفشانی رخ داده است (Herazo et al., 2020).

دگرسانی

در شمال شیلی کانی‌های ثانویه شامل آلپینی شدن با اپیدوت جزئی، سریسیت، کلریت و کلسیت فراوان و در ناحیه مرکزی شیلی کوارتز و کلریت در رگه‌های سنگ‌های آتشفشانی وجود دارد

مجموعه آتشفشانی - نفوذی البرز - آذربایجان از جمله کانسار ماری (Maghfouri et al., 2017)، کانسار عباس آباد (Maghfouri and Movahednia., 2015) در شاهرود و دامغان و زون سندج - سیرجان از جمله کانسار کشت مهکی (Boveiri et al., 2013) اشاره کرد که نشان دهنده وجود توانایی قابل توجه از این نوع کانسار است (شکل ۱).

همچنین می توان به مهم ترین کانسارهای نوع مانتو در ناحیه بردسکن تا درونه از جمله کانسارهای زنگانلو (Ghelichkhani and Malekzadeh Shafaroudi, 2018; Ghelichkhani Mahvashi and Malekzadeh et al., 2021)، چشمه گز (Shafaroudi., 2016)، کال ابری (Jabbari et al., 2017)، ترنم (Entezarab, 2018)، کیمیا (Amini zahan et al., 2020) رهبری، چشمه مرضیه (Soltani and Fardost, 2016)، ریزاب (Jonidi and Fardost, 2017)، دهنه سیاه، شریف آباد (Ebrahimi et al., 2018) و معدن مس نسیم اشاره کرد (شکل ۱ و شکل ۲). همچنین معدن مس گل چشمه در جنوب نیشابور در زیرپهنه سبزوار نمونه دیگری از ذخایر مس مانتو است (Entezari et al., 2017; Najmi et al., 2017).

دو کانسار مس نوع مانتو در زون ساوه - جیرفت قرار دارد که می توان به کانسار وشنوه و کانسار کشکوفیه (Abolipour et al., 2015) اشاره کرد.

بر اساس شواهد نبود ماگماتیسم بین ساوه تا حدود تکاب و نبود آنومالی مغناطیس هوایی، نام کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر تغییر یافت (Karimpour et al., 2021). ماگماتیسم ارومیه تا تکاب، ادامه کمر بند ماگمایی البرز غربی است. بر اساس ویژگی های ماگماتیسم و کانی سازی، کمر بند ساوه - ناین و جیرفت را می توان به دو کمر بند مجزا تقسیم کرد: ۱) کمر بند ماگمایی ساوه - ناین شامل گرانیتهای میوسن سری مگنتیت نوع I عقیم غیر آداکتی است.

۲) کمر بند ماگمایی ناین - جیرفت که میزبان کانسارهای پورفیری است (Karimpour et al., 2021).

سنگ دربرگیرنده شان هستند. در نتیجه این تئوری منسوخ و غیر قابل قبول است.

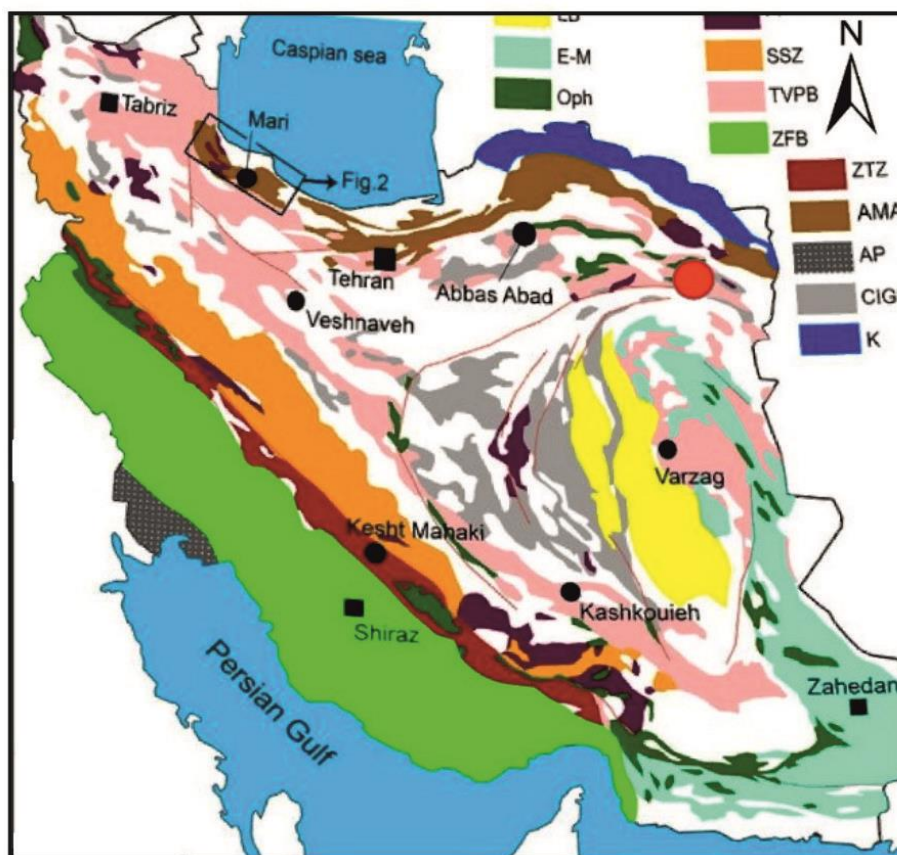
تئوری اپی ژنتیک مشتق شده از توده های نفوذی: زون های کانی سازی اولیه در کانسارهایی که حالت توده ای دارند، به نفوذ دایک های گابرویی و دیوریتی وابسته است. علاوه بر این توزیع زون بندی کانی های اولیه مس با فاصله از توده های گابرویدوریت در کانسارهای بوئنا اسپرانزا و لاینس استفانیا در محدوده توکوپیل تالال^{۱۹} مشخص شده است (طی بررسی دایک های نفوذی در پنجره بردسکن و کانسار مس نسیم، هیچ گونه کانی سازی در دایک های منطقه مشاهده نشد. این فرضیه در قسمت نتیجه گیری به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است).

تئوری مشتق شده از سنگ میزبان: در این مورد سنگ میزبان به عنوان منشأ تشکیل دهنده کانی سازی معرفی شده است که به دلیل حضور قابل ملاحظه اجزای سنگ رسوبی است. همچنین بررسی های زمین شیمیایی انجام شده بر روی سنگ میزبان آتشفشانی تئوری منشأ بودن سنگ میزبان را تأیید می کند (Zentilli, 1974) (سنگ آتشفشانی در پنجره بردسکن دارای آهن بالایی به شکل مگنتیت در ترکیب خود است و اگر منشأ باشد، باید پیریت و کالکوپیریت تشکیل شود. این فرضیه در قسمت نتیجه گیری مورد بررسی قرار گرفته است).

بررسی های ایزوتوپی بیانگر شرایط تشکیلی است که در آن ذخایر مس شیلی از نوع مانتو به طور اپی ژنتیکی در فرایند برهم کنش هیدروترمال آب شور مشتق شده از سطح غیر ماگمایی با سنگ های میزبان آتشفشانی - رسوبی تشکیل شده است که استنباط می شود، این آب از یک عمق زیاد منشأ گرفته است. مجموعه پلوتونیک به عنوان منبع حرارتی ممکن در این فرایند نقش داشته است (Kojima et al., 2009).

کانسارهای مس مانتو در ایران

از کانسارهای مهم مانتو در ایران می توان به کانسارهای آتشفشانی شرق ایران از جمله کانسار ورزگ (Alizadeh et al., 2012)،



شکل ۱. نقشه توزیع کانسارهای مس نوع مانتو در زون های ساختاری ایران (Maghfouri et al., 2017)

Fig. 1. Distribution map of Cu manto type deposits in the structural zones of Iran (Maghfouri et al., 2017)

کانسار مس نسیم

محدوده معدنی مس نسیم در شمال شرق ایران در فاصله ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان بردسکن و ۳۲۵ کیلومتری جنوب غرب مشهد در استان خراسان رضوی واقع شده است. این کانسار بخشی از صفحه ایران مرکزی بوده و در حد فاصل شمالی گسل درونه جای گرفته است. گسل درونه جداکننده زون های ساختاری سبزوار و البرز در شمال و بلوک لوت در جنوب است (شکل ۳ و شکل ۴).

این محدوده قسمتی از زیرپهنه سبزوار و منطقه اوریان است که در بخش انتهایی کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن واقع شده است. جنبش های زمین ساختی فشاری و نیرومند، الگوی

تقریباً پیچیده ای از چین ها و روراندها در این زون ایجاد کرده است و رسوبات پالئوژن تمامی واحدهای موجود در این زون را پوشش می دهند که در تصویر ماهواره ای، حالت چین خوردگی مشخص است (شکل ۵).

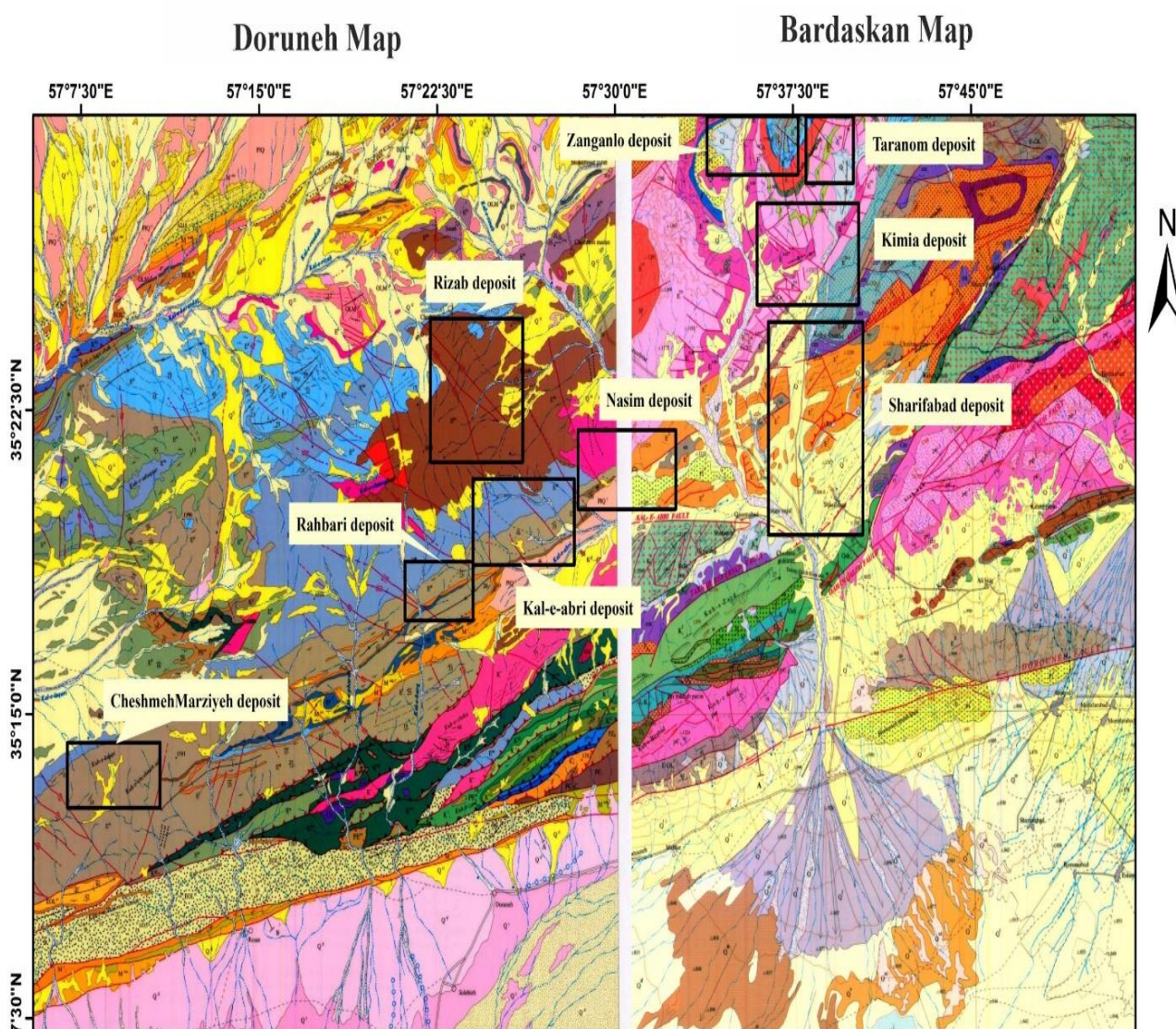
در این پنجره جنبش های زمین ساختی باعث ایجاد ساختارهای تاقدیس^{۲۰} و ناودیس^{۲۱} شده است که موقعیت کانسارهای مس مانتو بر روی یال این ساختارها قرار گرفته است (شکل ۴).

تاقدیس چینی است که لایه های قدیمی در مرکز آن قرار دارند؛ در حالی که ناودیس به چینی گفته می شود که به طرف بالا مقعر است و بر عکس تاقدیس، در ناودیس لایه های جوان تر در مرکز

یافته‌اند و در مرکز این تاقدیس، بازالت وجود دارد که قدیمی‌ترین واحد منطقه است. زون کانی‌سازی در کانسار مس نسیم که در داخل کنگلومرا تشکیل شده است، در خارجی‌ترین بخش تاقدیس قرار گرفته است (شکل ۵).

آن قرار دارند. ناودیس و تاقدیس متضاد یکدیگر در چین خوردگی هستند.

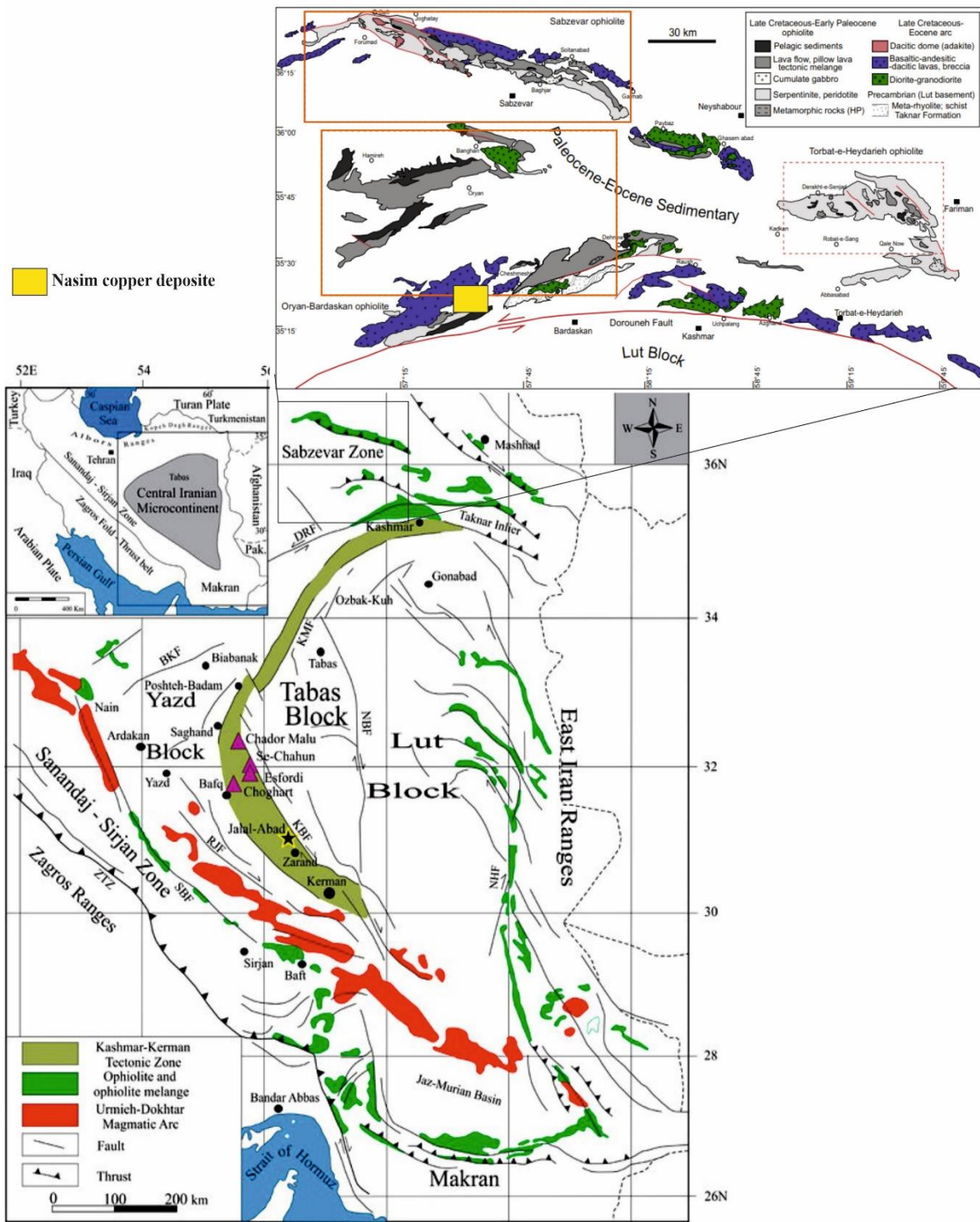
در اینجا کانسار مس نسیم در انتهای یال یک تاقدیس واقع شده است. در این منطقه جوان‌ترین واحد، سنگ آهک و سپس کنگلومراست که در خارجی‌ترین قسمت یال تاقدیس رخنمون



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بردسکن (Shahrabi et al., 2006) و درونه (Qaemi and Mousavi Harami, 2006). موقعیت

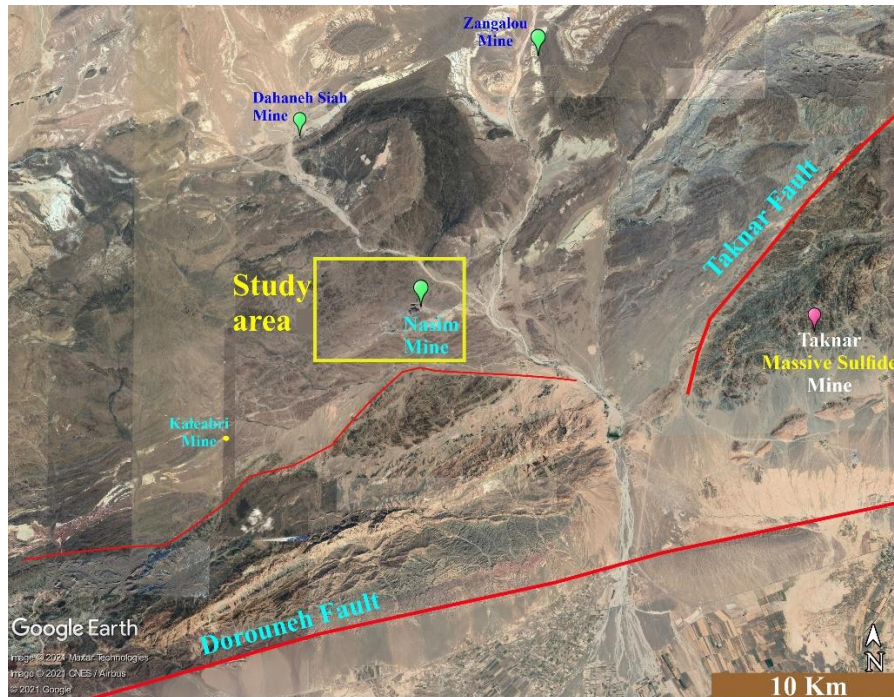
محدوده‌های کانی‌سازی مس توخ مانتو نسیم، کال ابری، زنگانلو، کیمیا، ترنم، شریف‌آباد، ریزاب، رهبری و چشمه مرضیه نمایش داده شده است.

Fig. 2. Geological map 1:100,000 of Bardaskan (Shahrabi et al., 2006) and Doruneh (Qaemi and Mousavi Harami, 2006). The location of Cu Mato Type: Nasim, Kal Abri, Zanganlu, Kimia, Tarnam, Sharifabad, Rizab, Rahbari and Cheshme Marzieh areas are plotted.



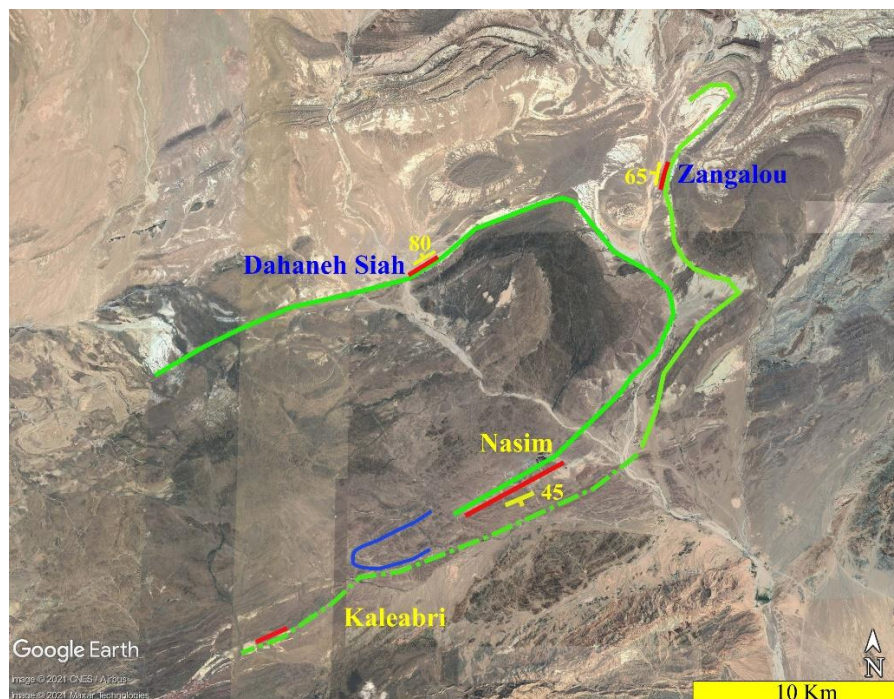
شکل ۳. تصویری از موقعیت افیولیت شرق ایران، زون سیزوار، اوریان و نمایش موقعیت کنسار مس نسیم در آن (Shafaii Moghadam et al., 2015)

Fig. 3. An image of the location of ophiolite of Eastern Iran, Sabzevar and Oryan zone and the location of Nasim copper deposit (Shafaii Moghadam et al., 2015)



شکل ۴. تصویر گوگل ارث از موقعیت کانسار مس نسیم نسبت به گسل درونه

Fig. 4. Google Earth image of the location of Nasim copper deposit in relation to the Dorouneh fault



شکل ۵. تصویر گوگل ارث از نمایش چند کانسار مس نوع مانتو: نسیم، کاله ابری، زنگالو و دهنه سیاه و موقعیت مکانی آنها در افق چین خورده

Fig. 5. Google Earth image showing several mantle type copper deposits: Nasim, Kale Abri, Zangalou and Dhehne Siah and their locations on the folded horizon

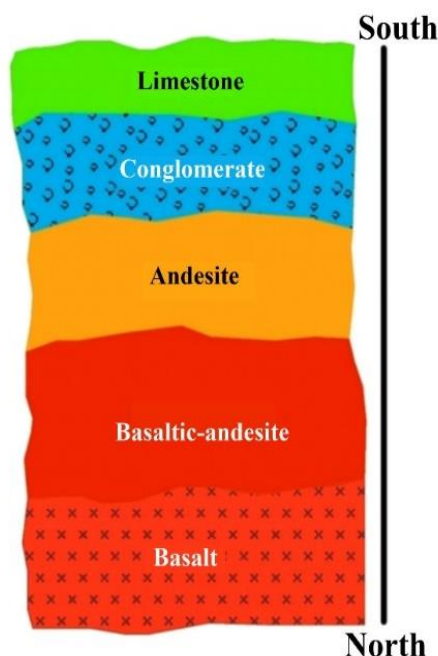
زمین شناسی نسیم

محدوده مورد بررسی با مساحت تقریبی ۴۴ کیلومتر مربع در غرب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بردسکن (Shahrabi et al., 2006)، در شرق نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ درونه (Qaemi and Mousavi Harami, 2006) و جنوب غرب نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشر (Eftekharnjad et al., 1976) قرار گرفته است.

بر اساس پروفیل هایی که از شمال به جنوب محدوده بررسی شده اند، ابتدا واحد بازالت در محدوده رخنمون یافته است و بعد از آن شاهد رخنمون آندزیت بازالت و سپس آندزیت هستیم. بعد از پایان فعالیت آتشفشانی در منطقه، یک واحد رسوبی از جنس کنگلومرا با قطعه های آتشفشانی تشکیل شده است و پس از آن واحد آهک دارای نومولیت رخنمون یافته است. با توجه به جوان تر بودن آهک نسبت به واحدهای آتشفشانی و بر اساس فسیل نومولیت در آهک، می توان نتیجه گرفت که سنگ های آتشفشانی

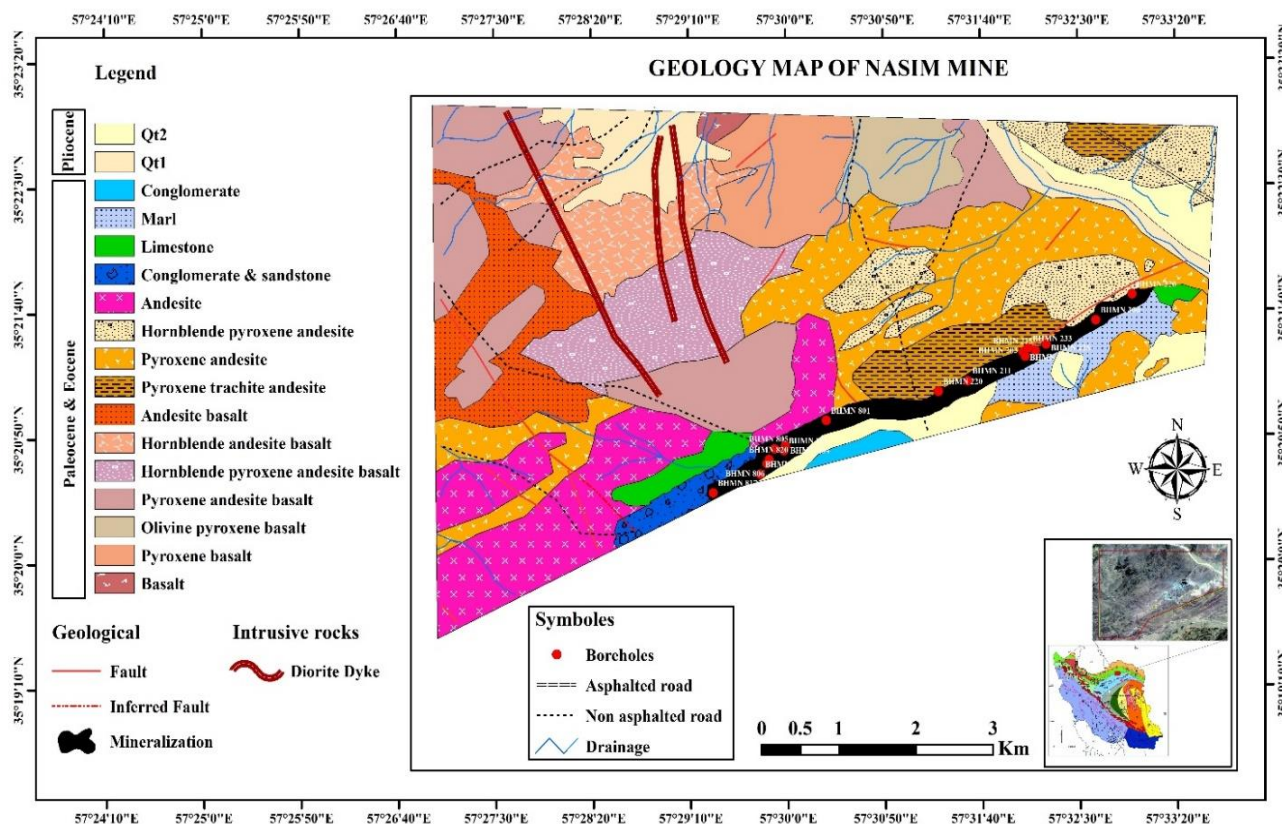
در این محدوده دارای سن اواخر ترشیری (پالئوسن-ائوسن) هستند و همچنین سن سنجی که توسط قلیچ خانی و همکارانش (Ghelichkhani et al., 2023) در محدوده زنگالو در شمال شرق نسیم به روش U-Pb زیرکن بر روی آندزیت صورت گرفته است، سن آندزیت را بین ۴۱/۲ و ۳۸/۴ Ma (بارتونین) نشان می دهد.

توالی زمین شناسی در محدوده نسیم از شمال به سمت جنوب از بازالت شروع می شود و به تدریج به آندزیت و سپس کنگلومرا و آهک می رسد (شکل ۶). واحدهای آتشفشانی با ترکیب هورنبلند پیروکسن آندزیت، پیروکسن آندزیت، پیروکسن تراکیت آندزیت، هورنبلند آندزیت بازالت، هورنبلند پیروکسن آندزیت بازالت، الوین پیروکسن بازالت، پیروکسن بازالت و بازالت در محدوده رخنمون یافته اند که دارای امتداد شمال شرق- جنوب غرب هستند (شکل ۷). چندین دایک از جنس دیوریت پورفیری در محدوده مشاهده شد که بدون کانی سازی بوده است.



شکل ۶. تصویر شماتیک از واحدهای رخنمون یافته در پروفیل پیمایشی در کانسار مس نسیم از شمال به سمت جنوب

Fig. 6. Schematic image of outcrop units in the survey profile in the Nasim copper deposit from north to south



شکل ۷. نقشه زمین شناسی کانسار مس نسیم و موقعیت زون کانی سازی و گمانه های حفاری بر روی آن

Fig. 7. Geological map of Nasim copper mine and the location of mineralization zone and drilling boreholes

آندزیت

واحد آندزیت در جنوب غربی محدوده مورد بررسی به رنگ خاکستری روشن با وسعت حدود ۳ کیلومتر رخنمون دارد که به دلیل فرسایش به صورت هموار و کم ارتفاع است (شکل ۷). واحد آندزیت دارای بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال است که کانی اصلی آن پلاژیوکلاز (۳۰ تا ۳۵ درصد) است و به صورت درشت بلور قابل مشاهده است. در این واحد کانی ثانویه سلادونیت، کلریت، کلسیت، کوارتز و زئولیت به صورت پرکننده حفره ها تشکیل شده اند (شکل ۸-A، B و D).

تپه ماهور و در مرکز محدوده با وسعت ۱/۵ کیلومتر به صورت کم ارتفاع و هموار در داخل واحد پیروکسن آندزیت مشاهده می شود (شکل ۷). واحد هورنبلند پیروکسن آندزیت در صحرا دارای رنگ خاکستری روشن است که حفره های آن توسط کانی ثانویه سلادونیت، کلریت و کلسیت و مقدار جزئی زئولیت پر شده است. این واحد دارای بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال است که کانی اصلی و فتوکریست آن پلاژیوکلاز در حدود ۴۲ تا ۴۳ درصد است و کانی هورنبلند و پیروکسن نیز با چشم مشاهده می شود.

پیروکسن آندزیت

پیروکسن آندزیت با گسترش بالایی (حدود ۵ کیلومتر) در مرکز و با وسعت کمتر (۳ کیلومتر) در جنوب شرقی محدوده رخنمون

هورنبلند پیروکسن آندزیت

این واحد با وسعت تقریباً ۲ کیلومتر در شمال شرقی با توپوگرافی

کوارتز است که به صورت پرکننده حفره‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۸-۷).

هورنبلند آندزیت بازالت

این واحد با وسعت تقریباً ۱/۵ کیلومتر در شمال غرب محدوده با توپوگرافی تقریباً کوهستانی و به رنگ خاکستری تیره تا سیاه رخنمون دارد. بافت این واحد پورفیری و آمیگدالوئیدال است که شامل درشت بلورهای پلاژیوکلاز (۲۰ تا ۲۵ درصد) و هورنبلند (۵ تا ۷ درصد) است (شکل ۷).

هورنبلند پیروکسن آندزیت بازالت

رخنمون این واحد در مرکز محدوده به سمت غرب است که در صحرا دارای رنگ خاکستری تیره تا سیاه و توپوگرافی تقریباً کوهستانی با وسعت حدود ۳ کیلومتر است. واحد پیروکسن هورنبلند آندزیت بازالت دارای بافت پورفیری است که درشت بلورها در آن از پلاژیوکلاز (۲۵ تا ۲۸ درصد)، پیروکسن (۶ تا ۷ درصد) و هورنبلند (۴ تا ۵ درصد) تشکیل شده است (شکل ۷).

پیروکسن آندزیت بازالت

این واحد در مناطق مختلفی از محدوده مورد بررسی با وسعت حدود ۱/۵ تا ۲ کیلومتر رخنمون دارد که دارای رنگ خاکستری تیره تا سیاه است. رخنمون این واحد در صحرا به صورت کم ارتفاع و تپه ماهور است. کانی‌های قابل مشاهده در این واحد پلاژیوکلاز (۲۵ تا ۲۷ درصد) و پیروکسن (۵ تا ۷ درصد) و به صورت درشت بلور است (شکل ۷).

الیوین پیروکسن بازالت

واحد الیوین پیروکسن بازالت در شمال محدوده مورد بررسی با وسعت ۱/۴ کیلومتر قرار گرفته است. رخنمون این واحد در صحرا به رنگ سبز تیره تا سیاه است. از نظر ریخت‌شناسی ارتفاع کمی دارد و به صورت تپه ماهوری است. بافت غالب این واحد پورفیری

دارد. همچنین این واحد دارای رخنمون‌های کوچک و پراکنده در بخش جنوب غربی محدوده مورد بررسی است (شکل ۷). واحد پیروکسن آندزیت در صحرا به شکل تپه ماهور و خاکستری روشن دیده می‌شود. بافت اصلی این واحد پورفیری و آمیگدالوئیدال است. در نمونه دستی حدود ۲۵ تا ۳۷ درصد درشت بلور پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود و کانی پیروکسن به صورت مدور و تیره رنگ وجود دارد. رگچه‌های کربناته با اندازه تقریبی ۱/۷ تا ۲/۷ میلی‌متر مشاهده می‌شوند (شکل ۷). کانی‌های ثانویه کلریت و کلسیت هستند که به صورت رگچه‌ای و پرکننده حفره‌ها ایجاد شده‌اند.

پیروکسن تراکیت آندزیت

واحد پیروکسن تراکیت آندزیت در قسمت شمال شرق با وسعت ۱/۳ کیلومتر و همچنین در قسمت جنوبی محدوده با وسعت ۲/۵ کیلومتر در برخورد با زون کانی‌سازی قرار دارد (شکل ۷). این واحد نیز در صحرا به رنگ خاکستری روشن و به دلیل فرسایش به صورت هموار و کم ارتفاع مشاهده می‌شود. بافت اصلی این واحد پورفیری، آمیگدالوئیدال و تراکیتی است و دارای کانی‌های ثانویه زئولیت، کلریت و کلسیت به صورت پرکننده حفره‌هاست. واحد پیروکسن تراکیت آندزیت در نمونه دستی دارای درشت بلور پلاژیوکلاز (۲۳ تا ۳۵ درصد) و کانی پیروکسن (۵ تا ۶ درصد) است (شکل ۷).

آندزیت بازالت

این واحد در قسمت غربی محدوده مورد بررسی با وسعت تقریباً ۲ کیلومتر قرار دارد. رخنمون این واحد در صحرا به رنگ خاکستری تیره تا سیاه و تپه ماهور است و در برخی نقاط با سطوح فرسایشی صاف و هموار نیز مشاهده می‌شود (شکل ۷). این واحد دارای بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال است که درشت بلورهای آن شامل پلاژیوکلاز (۲۵ تا ۳۰ درصد) و پیروکسن (۷ تا ۱۰ درصد) از ویژگی‌های این واحد است. مهم‌ترین کانی ثانویه آن کلریت و

نومولیت، فرامینفر است. بیشترین میزان خرده فسیلی مربوط به نومولیت با فراوانی ۲۵ تا ۳۷ درصد است.

پکستون: این واحد سنگ آهکی است که اجزای اولیه آن در طی رسوب گذاری به همدیگر متصل نشده است و همراه گل آهکی با دانه‌های فراوان است. خرده فسیلی با فراوانی ۶۵ تا ۷۷ درصدی، بیشتر شامل نومولیت، فرامینفر است که با کلسیت و گاهی با کانه‌هایی چون کالکوسیت به صورت جزئی پر شده اند. بیشترین میزان خرده‌های فسیلی مربوط به نومولیت با فراوانی ۴۵ تا ۴۷ درصد است. کانی‌های کدر با فراوانی ۱ تا ۵ درصد به همراه رگچه‌های کلسیت در متن سنگ مشاهده می‌شود.

کنگلوما

دو نوع کنگلوما با دو سن متفاوت در محدوده مشاهده شد (شکل ۷). کنگلومرای قدیمی تر (پالئوسن - ائوسن) در ارتباط با کانی‌سازی است که دارای قطعه‌های گرد شده است. اندازه قطعه‌های آن از حدود ۲ سانتی‌متر تا ۴-۵ سانتی‌متر متغیر است. جنس قطعه‌ها ۹۰ تا ۹۵ درصد دارای ترکیب آتشفشانی است که این قطعه‌ها شامل آندزیت، پیروکسن آندزیت، تراکیت، تراکی آندزیت، پیروکسن تراکی آندزیت، توف آندزیتی، هورنبلند داسیت است و همچنین دارای قطعه‌هایی از جنس واحدهای نفوذی از جمله دیوریت، مونزونیت، پیروکسن دیوریت و واحدهای نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریت پورفیری، مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری است (شکل ۹-۹، A، B و C). این کنگلوما دارای سیمانی با ترکیب ولکانیکی در نزدیک آندزیت است (شکل ۹-۹) و با دور شدن از آندزیت و حرکت به سمت افق‌های بالاتر سیمان کربناتی می‌شود (شکل ۹-۹) هرچه به آهک نزدیک تر می‌شویم، اندازه قطعه‌ها کوچک تر و درصد آن کاهش می‌یابد و در نهایت با دریایی شدن محیط، آهک تشکیل می‌شود. در کنگلوما، قطعه‌های رسوبی مانند شیل نیز مشاهده شد (شکل ۹-۹).

دانه‌ریز است که کانی‌های قابل مشاهده در نمونه دستی پلاژیوکلاز (۱۵ تا ۱۷ درصد) و پیروکسن (۵ تا ۶ درصد) است و الیون در مقطع میکروسکوپی (۱۰ تا ۱۵ درصد) مشاهده شد (شکل ۷).

پیروکسن بازالت

این واحد نیز در مجاورت واحد الیون پیروکسن بازالت در شمال محدوده و به رنگ خاکستری تیره تا سیاه با توپوگرافی کم ارتفاع رخنمون دارد و دارای وسعت حدود ۱/۴ کیلومتر است. این واحد دارای بافت پورفیری دانه ریز و کمی آمیگدالوئیدال است که با کانی ثانویه کلریت پر شده است. کانی‌های قابل مشاهده پلاژیوکلاز (۱۸ تا ۲۰ درصد) و پیروکسن (۱۵ تا ۲۰ درصد) است (شکل ۷).

بازالت

رخنمون بسیار کوچکی با وسعت ۵۰۰ متر از این واحد در شمال محدوده به رنگ سیاه مشاهده می‌شود و به دلیل سطح فرسایشی به صورت هموار و کم ارتفاع است. این واحد نیز دارای بافت پورفیری بسیار دانه‌ریز است و کانی‌های قابل مشاهده در نمونه دستی پلاژیوکلاز (۱۵ تا ۲۰ درصد) و پیروکسن (۱۵ تا ۲۰ درصد) است (شکل ۷).

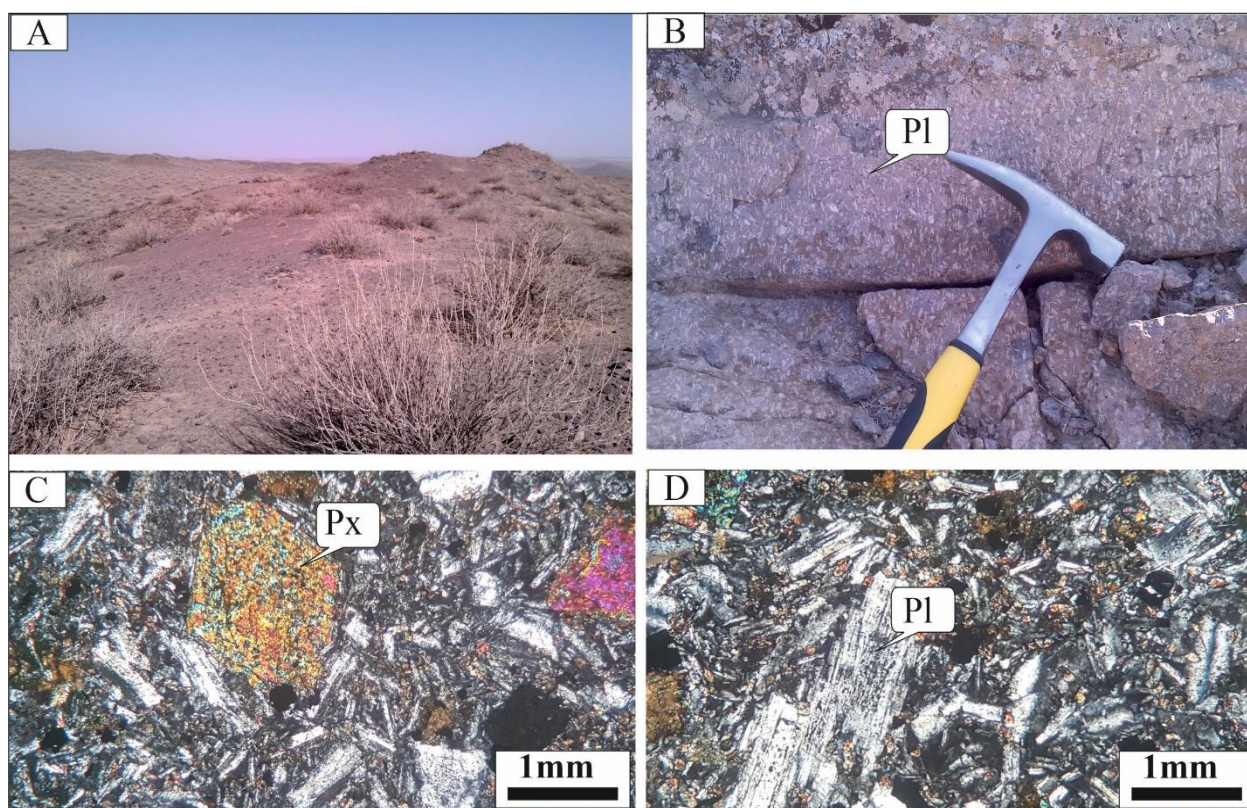
واحد کربناته

این واحد در بالای کنگلومرای پالئوسن - ائوسن که در ارتباط با کانی‌سازی است، واقع شده است (شکل ۷). در بررسی‌های سنگ‌نگاری و فسیل‌شناسی، شامل سنگ آهک با فسیل شاخص نومولیت به سن ائوسن است. این واحد پس از شناسایی و تشخیص اجزای سازنده آنها از نوع پکستون و وکستون است.

وکستون: این سنگ آهک گلی و حاوی بیش از ۱۷ درصد دانه است و اجزای اولیه در طی رسوب گذاری به یکدیگر متصل نشده است. خرده فسیلی با فراوانی ۳۵ تا ۴۷ درصد، بیشتر شامل

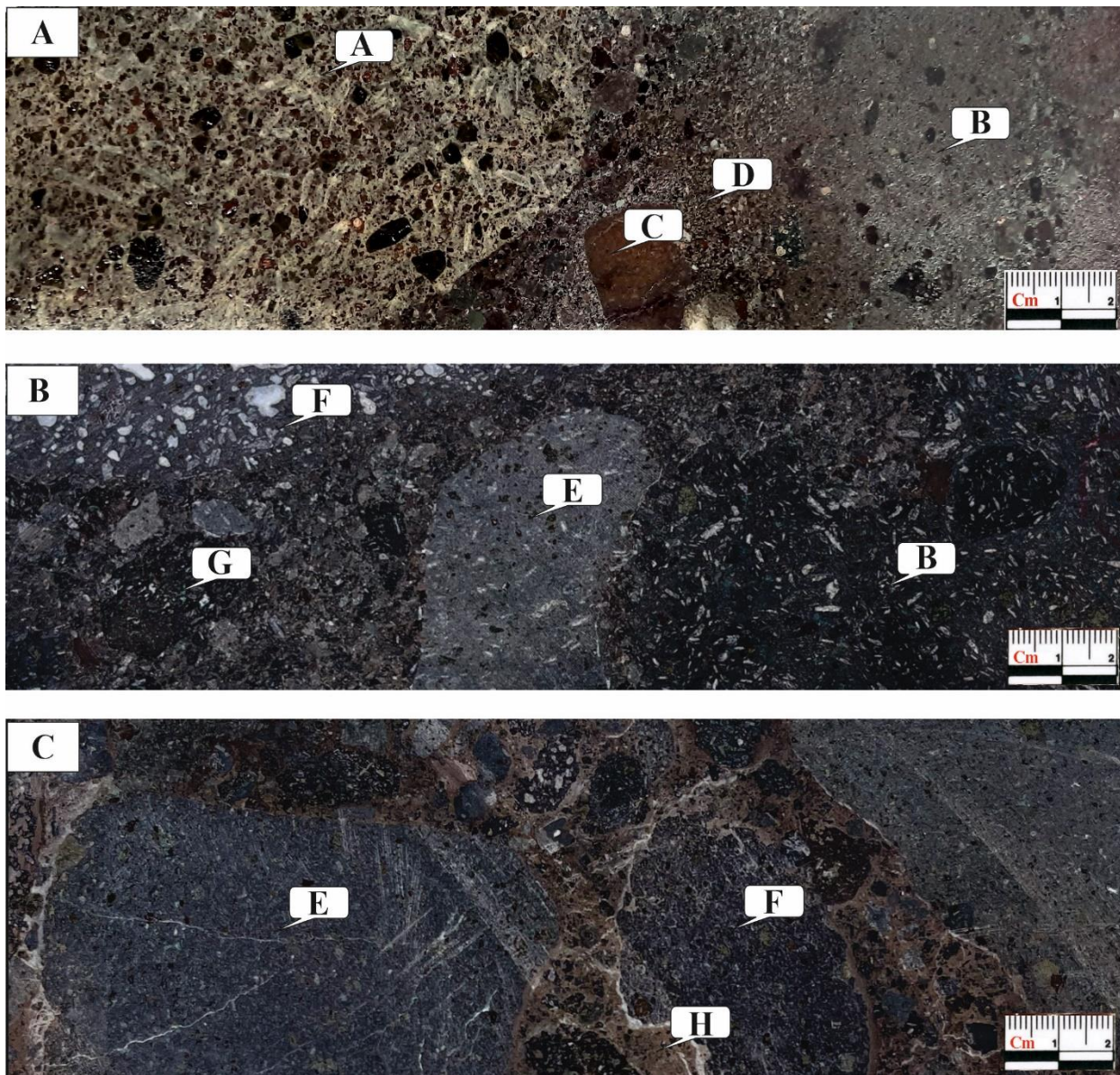
برخی از مشاوران اکتشاف در جغرافیای بردسکن، به جای کنگلومرا از واژه آگلومرا استفاده کرده‌اند و معتقدند که کانی‌سازی در آگلومرا ایجاد شده است که این قابل قبول نیست؛ زیرا آگلومرا در طی فعالیت آتشفشانی ایجاد می‌شود و در اینجا کنگلومرا در طی فرایند فرسایشی ایجاد شده است و کانی‌سازی از نظر زمانی جوان‌تر از سنگ‌های آتشفشانی است (شکل ۹-A، B و C).

محیط در زمان تشکیل کنگلومرا دریایی نبوده؛ بلکه در زمان فرسایش محیط رودخانه‌ای بوده و به تدریج دریایی شده است. سیمان کنگلومرا ابتدا آتشفشانی و به تدریج به آهک تبدیل می‌شود؛ یعنی محیط بعد از کنگلومرا به تدریج دریایی می‌شود و ادامه می‌یابد که در محیط دریا باعث تشکیل آهک می‌شود و این نشان‌دهنده عمیق شدن محیط دریایی است (شکل ۹-A، B و C).



شکل ۸. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از واحد آندزیت در کانسار مس نسیم. A: تصویر صحرایی از واحد آندزیت به رنگ خاکستری با مورفولوژی ملایم در شمال غرب کانسار مس نسیم (دید به سمت شمال شرق)، B: تصویر صحرایی از نمونه دستی واحد سنگی آندزیت و کانی پلاژیوکلاز، C: تصویر میکروسکوپی از درشت بلورهای هورنبلند و پیروکسن در واحد آندزیت بازالت (XPL) و D: تصویر میکروسکوپی از واحد آندزیت و درشت بلور پلاژیوکلاز (XPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Px: پیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز).

Fig. 8. Field and microscopic images of andesite unit in the Nasim copper deposit A: Field image of the gray andesite unit with mild morphology in the north-west of the Nasim copper deposit (view towards the northeast), B: Field image of a sample of andesite rock and plagioclase mineral, C: Microscopic image of hornblende and pyroxene phenocryst minerals in basaltic andesite (XPL), and D: Microscopic image of andesite and plagioclase phenocryst. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Px: pyroxene, Pl: plagioclase).



شکل ۹. تصویرهایی از کنگلومرا با قطعه‌های مختلف آتشفشانی و توده نفوذی در کانسار مس نسیم. A: (A): مونزونیت با دگرسانی پروپلیتیک (اپیدوت)، (B): آندزیت با کانی پلاژیوکلاز در زمینه، (C): شیل، (D): سیمان ولکانیکی، B: تصویری از قطعه‌های کنگلومرا به صورت گرد شده، (B): آندزیت با کانی پلاژیوکلاز در زمینه، (E): دیوریت پورفیری دارای دگرسانی پروپلیتیک (اپیدوت)، (F): پیروکسن آندزیت با بافت آمیگدالوئیدال که حفره‌ها توسط سیلیس و کربنات پر شده است، (G): آندزیت با زمینه کدر (اغلب مگنتیت) و C: تصویری از کنگلومرا با سیمان کربناتی (F): آندزیت با زمینه کدر (اغلب مگنتیت)، (E): پیروکسن آندزیت با زمینه روشن و ریز دانه، (H): سیمان کربناتی

Fig. 9. Images of conglomerate with different volcanic and intrusive fragments in the Nasim copper deposit. A: (A): Monzonite with propylitic alteration (epidote), (B): Andesite with plagioclase in background, (C): Shale, (D): volcanic cement, B: Image of rounded conglomerate fragments, (B): Andesite with plagioclase mineral in the background, (E): Diorite porphyry with propylitic alteration (epidote), (F): Pyroxene andesite with amygdaloidal texture filled with silica and carbonate, G: Andesite with opaque in background (mostly magnetite), and C: image of conglomerate with carbonate cement, (F): Andesite with opaque in background (mostly magnetite)., (E): Pyroxene andesite with bright and fine-grained background, (H): carbonate cement

کانی‌سازی و دگرسانی

کانی‌سازی واژه مانتو برگرفته از این اصل است که در توالی مجموعه سنگ‌های آتشفشانی، در افقی که واحد کنگلومرا و یا برش آتشفشانی دارای تخلخل مفید و مناسب بوده، کانی‌سازی شکل گرفته است. بنابراین واژه مانتو واژه‌ای علمی و ژنتیکی نیست و ضرورت دارد نامی که بیانگر شیمی محلول و شرایط تشکیل این سامانه است، انتخاب شود.

موضوع مهم دیگر در ارتباط با این نوع کانسارها، بحث پاراژنز است که بر اساس آن می‌توان کانسارهای مس مانتو را به دو مجموعه تقسیم کرد: گروه اول، گروهی است که کانی اصلی و مهم آن کالکوسیت است و گروه دوم، در صورتی که در سطح جهانی، پاراژنز درست تشخیص داده شده باشد، می‌توان به مس مانتو با توالی پاراژنری کالکوپیریت، پیریت و گاهی بورنیت و در شرایط خاص کالکوسیت اشاره کرد.

در پنجره بردسکن بیش از ده کانسار مس مانتو کشف شده است که در مرحله بهره‌برداری هستند. در این کانسارها، کانی مهم و اصلی کانی کالکوسیت است. بر اساس بررسی‌هایی که در این منطقه انجام شده است، مشخص شده که سن کانی‌سازی کالکوسیت جوان‌تر از سنگ‌های آتشفشانی، کنگلومرا و سنگ‌های آهک است. از آنجایی که هویت یک سامانه را پاراژنز مشخص می‌کند، متأسفانه پاراژنری‌هایی که در کانسارهای مس مانتو در ایران و دیگر کشورها به ویژه شیلی بیان شده است، هیچ ارتباط زمانی، مکانی و منشائی با تشکیل کانی‌سازی کالکوسیت نداشته است و دلیل اصلی و مهم این است که در این سامانه‌ها باید نگاه ویژه‌ای به مسئله کنگلومرا داشت؛ زیرا کنگلومرا حاوی قطعه‌های مختلف سنگ‌های آتشفشانی است و در پنجره بردسکن علاوه بر سنگ‌های آتشفشانی، چند قطعه توده نفوذی در داخل کنگلومرا مشاهده می‌شود.

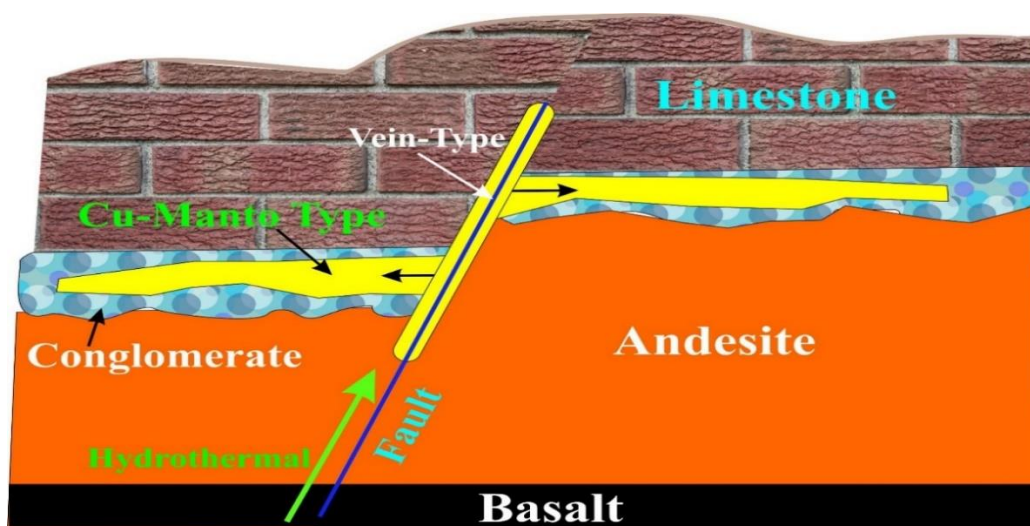
نکته مهم، این است که قبل از تشکیل کنگلومرا، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی در مقاطع زمانی خاص در معرض دگرسانی قرار گرفته‌اند و نمی‌توان این دگرسانی‌ها و کانی‌سازی‌ها را به کالکوسیت نسبت داد و به عنوان پاراژنز کالکوسیت در نظر گرفت.

در اینجا، دلیل وجود مشکل، این است که پژوهشگران نتوانسته‌اند زمان‌های مختلف دگرسانی را که قبل از تشکیل کنگلومرا ایجاد شده است و کانی‌هایی که از لحاظ دگرسانی و شیمی، محلول خاصی در تشکیل آن نقش داشته است را مشخص کنند. به عنوان مثال قطعه توده نفوذی حاوی کانی اپیدوت است. برای تشکیل اپیدوت، محلول بلیید اکسیدان و غنی از آهن باشد، بنابراین اپیدوت نمی‌تواند در زمان کالکوسیت تشکیل شده باشد. در نتیجه کانی اپیدوت مربوط به قبل از کانی‌سازی است. مجموعه‌ای از کانی‌سازی و دگرسانی‌ها در داخل کنگلومرا قرار دارد که هر کدام از آنها یک رخداد زمانی قبل از تشکیل کنگلومرا در منطقه را بیان می‌کند. به عنوان مثال در تمام سنگ‌های آتشفشانی پنجره بردسکن و سایر مناطق ایران، آندزیت‌ها حاوی ۴ تا ۵ درصد مگنتیت هستند و این سنگ‌ها در معرض فرسایش خرد شده‌اند. در داخل سیمان کنگلومرا، ذراتی از مگنتیت مشاهده می‌کنیم که پژوهشگران این مگنتیت را به عنوان پاراژنز در نظر گرفته‌اند که این صحیح نیست؛ زیرا در زمان تشکیل کالکوسیت (Cu_2S)، محلول فقیر از آهن بوده است؛ بنابراین نمی‌توان مگنتیت را به عنوان پاراژنز در نظر گرفت.

در واحد کنگلومرا به دلیل تخلخل خوب کنگلومرا، اغلب محلول از طریق گسل‌ها بالا آمده و در داخل کنگلومرا نفوذ کرده است و کانی‌سازی به صورت محدود در سنگ کربناته مشاهده می‌شود. این

می دهد که محلول، شیمی خاصی دارد. مهم ترین و اصلی ترین کانی سولفیدی موجود در منطقه مورد بررسی کالکوسیت است (شکل ۱۱) و مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، کوولیت به صورت ثانویه در بخش های مختلف کانسار مشاهده می شوند. این کانه ها به صورت رگچه ای رخ داده اند و دارای بافت دانه پراکنده، پرکننده حفره های خالی (آمیگدالوئیدال)، اسکلتی و جانشینی هستند.

کانی سازی ها هیچ رابطه زمانی و منشائی با فرایند آتشفشانی و زمان تشکیل کنگلومرا نداشته است و تخلخل موجود در کنگلومرا و ساختار گسلی در منطقه نقشی مهم در کانی سازی ایفا کرده است (شکل ۱۰). محلول مس مانتو، محلولی فقیر از آهن و سیلیس و کاملاً احیایی است و این محلول با این ویژگی ها با هیچ شرایطی نمی تولند با آهک واکنش دهد؛ بنابراین در آهک، عیار کانی سازی بسیار پایین است و این نشان



شکل ۱۰. تصویری از موقعیت کانی سازی در افق کنگلومرا در کانسار مس نسیم و نقش گسل در تشکیل آن

Fig. 10. An image of the location of mineralization within conglomerate in the Nasim copper deposit and the role of fault in its formation

کانی سازی و ۲) هم زمان با کانی سازی. دگرسانی قبل از کانی سازی شامل سلادونیت، کربناتی، سیلیسی و پروپیلیتیک ناحیه ای (اپیدوت و کلریت) است و در نوع دوم که هم زمان با کانی سازی است، مقدار جزئی کلریت، زئولیت و کلسیت ایجاد شده است (شکل ۱۲) و کانی اپیدوت مشاهده نشد که در بخش شیمی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین با توجه به شکل ۱۱، کانی کوارتز همراه با کالکوسیت مشاهده نشد که نشان می دهد، در زمان تشکیل کالکوسیت محلول فقیر از سیلیس بوده و

کانی سازی در داخل واحد کنگلومرا و در داخل درز و شکستگی ها رخ داده است. ضخامت این زون در حدود ۱ تا ۱۲ متر و عیار میانگین ۱ تا ۱/۵ است. شیب زون کانی سازی حدود ۴۵ درجه و دارای امتداد شمال شرق، جنوب غرب است (شکل ۷). موقعیت تعدادی از گمانه هایی که در داخل این زون حفاری شده است، بر روی نقشه زمین شناسی معدن نسیم مشخص شده است (شکل ۷) و مشخصات ۵ گمانه در جدول ۱ ارائه شده است. دگرسانی در محدوده نسیم به دو دسته تقسیم می شود: ۱) قبل از

کلریت است (شکل ۱۳). این دگرسانی در زمانی که توده نفوذ کرده است، در منطقه و قبل از فرسایش ایجاد شده‌اند. از آنجایی که آهن در محلول بالا بوده و محلول حالت اکسایش داشته است، اپیدوت تشکیل شده است و این دگرسانی مختص توده نفوذی است و ارتباطی با سنگ‌های آتشفشانی ندارد.

کوارتز تنها به صورت آمیگدال در داخل حفره‌های سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه مشاهده شد که مربوط به قبل و بعد از کانی سازی است. در داخل کنگلومرا، سنگ‌های آذرین نیمه عمیق (مونزونیت و دیوریت پورفیری) وجود دارد. این قطعه‌ها دارای اپیدوت و



شکل ۱۱. کانی کالکوسیت به صورت رگچه‌ای در سیمان کنگلومرا (در نمونه دستی در کانسار مس نسیم)

Fig. 11. Chalcocite veinlet within conglomerate cement (in a hand sample in the Nasim copper deposit)

جدول ۱. مشخصات تعداد برگزیده شده از گمانه‌های حفاری در کانسار مس نسیم

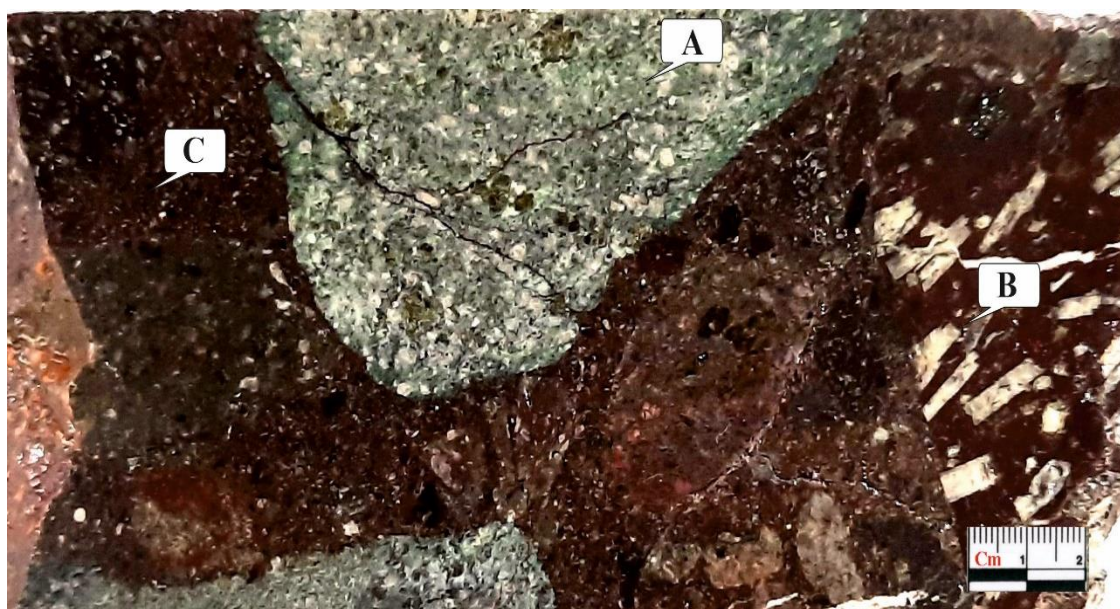
Table 1. characteristics of selected boreholes in the Nasim copper mine

Borehole	X	Y	Depth (m)	Cu%	Thickness of mineralization
BHMN 203	548493	3912700	69.7	0.26-1.19	6
BHMN 211	547778	3912350	51.8	0.19-0.39	8
BHMN 212	548524	3912650	111.2	0.13-0.41	10
BHMN 215	548656	3912720	124.7	0.14-2.79	8
BHMN 220	547399	3912220	60.2	0.13-1.41	14



شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپی از دگرسانی کلریت و کلسیت به صورت فراگیر در زمینه واحد آندزیتی در کانسار مس نسیم (در نور XPL). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Cal: کلسیت).

Fig.12. Microphotographs of chlorite and calcite (alteration) in the matrix of the andesite in the Nasim copper deposit (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: chlorite, Cal: calcite).



شکل ۱۳. تصویری از کنگلومرا با قطعه‌های مختلف سنگ آتشفشانی و توده نفوذی در کانسار مس نسیم، (A): مونزونیت با پروپیلیتیک (دارای اپیدوت)، (B): آندزیت با زمینه کدر، (C): آندزیت

Fig. 13. Image of conglomerate with different volcanic and intrusive fragments in the Nasim copper deposit, (A): Monzonite with propylitic alteration, (B): Andesite with opaque in background, (C): Andesite

بحث

طی بررسی‌هایی که در بخشی از شمال منطقه نزدیک محدوده مس دهنه سیاه عمود بر واحدهای سنگی تا محدوده نسیم انجام شد، توالی از مجموعه سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب ابتدا بازالت و سپس آندزیت بازالت و آندزیت در منطقه رخنمون دارد که دارای ضخامت حدود یک کیلومتر است (شکل ۶). در این توالی پیمایش شده، هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر اینکه این سنگ‌ها در محیط دریا تشکیل شده‌اند، وجود ندارد؛ اما زمانی که فرایند فعالیت آتشفشانی پایان می‌یابد و بعد فرسایش صورت می‌گیرد، کنگلومرایی تشکیل می‌شود که تعداد قطعه‌ها بین ۴۰ تا ۸۰ درصد متغیر است و بیش از ۹۰ درصد قطعه‌های آتشفشانی و درصد کمی شامل قطعه‌های نفوذی و نیمه عمیق است. اندازه قطعه‌ها در بعضی کنگلومراها تا حدود ۵ تا ۶ سانتی‌متر و بعضی زیر ۲ سانتی‌متر است. سیمان کنگلومرا در ابتدا از سنگ‌های آتشفشانی خرد شده به ویژه آندزیت تشکیل شده است و به سمت افق بالاتر، تعداد قطعه‌ها کمتر و اندازه آنها کوچک‌تر می‌شود و جنس سیمان نیز آهکی می‌شود. با افزایش عمق، سنگ آهک تشکیل شده است که دارای نومولیت است؛ بنابراین سن زمان تشکیل کنگلومرا را می‌توان به پالئوسن و ائوسن نسبت داد. ضخامت کنگلومرا از یک متر تا ۲۰ متر متغیر است.

در جغرافیای بردسکن از جمله نسیم، برخی مشاوران اکتشاف از واژه آگلومرا به جای کنگلومرا استفاده کرده‌اند. این افراد معتقدند که کانی‌سازی در آگلومرا ایجاد شده است. این ادعا قابل قبول نیست؛ زیرا آگلومرا در طی فعالیت آتشفشانی ایجاد می‌شود و قطعه‌های آن تنها از یک نوع ترکیب تشکیل شده است و دارای حالت گرد شده است (بمب آتشفشانی). کنگلومرا در طی فرایند فرسایشی ایجاد شده است و تمامی قطعه‌ها هنگام حمل شدن توسط آب رودخانه و یا در ساحل دریا گرد شده‌اند (شکل ۹). به کارگیری واژه آگلومرا، مشکل اساسی در خصوص زمان و نحوه تشکیل کانی‌سازی مس است. به طور قطع، عدم شناخت دقیق زمان کانی‌سازی، اکتشاف را به چالش می‌کشد.

کانی‌سازی فقط در واحد کنگلومرا تشکیل شده است. منطقه مورد بررسی بعد از کانی‌سازی دچار چین‌خوردگی شده است و مکان‌های کانی‌سازی در منطقه در بخش بالایی چین‌خوردگی رخنمون دارند (شکل ۵).

دگرسانی: با توجه به دگرسانی‌های موجود در کانسار مس نسیم که در قسمت دگرسانی مربوط به آن، مورد بررسی قرار گرفت، دگرسانی در این کانسار شامل دو دسته دگرسانی‌های قبل از کانی‌سازی و دگرسانی‌های هم‌زمان با کانی‌سازی است. در نوع دوم که هم‌زمان با کانی‌سازی است، مقدار جزئی کلریت، زئولیت و کلسیت ایجاد شده است (شکل ۱۲) و کانی‌اپیدوت مشاهده نشد که در بخش شیمی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین همراه با کانی کالکوسیت، کانی کوارتز مشاهده نشد که نشان می‌دهد در زمان تشکیل کالکوسیت، محلول فقیر از سیلیس بوده است (شکل ۱۱). کانی کوارتز در این کانسار مربوط به قبل و بعد از کانی‌سازی است و تنها به صورت آمیگدال در داخل حفره‌های سنگ‌های رخنمون‌یافته منطقه مشاهده شد.

کنگلومرا حاوی قطعه‌های سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه عمق است. این قطعه‌ها دگرسان شده هستند. بیشترین دگرسانی‌ها قبل از فرایند فرسایش و تشکیل کنگلومرا رخ داده‌اند. قطعه‌های مونزونیت و دیوریت پورفیری حاوی اپیدوت و کلریت هستند (دگرسانی پروپلیتیک). این دگرسانی هم‌زمان با نفوذ مونزونیت و دیوریت پورفیری در سنگ‌های آتشفشانی رخ داده است (قبل از شروع فرایند فرسایش). حضور اپیدوت در این توده نفوذی بیانگر بالا بودن آهن در محلول و اکسایش محلول است. بنابراین این دگرسانی فقط مختص توده نفوذی است و ارتباطی با سنگ‌های آتشفشانی ندارد.

کانی‌سازی: در کل پنجره نسیم، زنگالو، کلاته برق و ...، کانی‌سازی فقط در داخل کنگلومرا تشکیل شده است. در این کانسارها محلول گرمابی از طریق گسل بالا آمده و کانی‌سازی را در کنگلومرا که دارای تخلخل مفید بوده، ایجاد کرده است. این گسل در پنجره کانی‌سازی بردسکن به طور دقیق شناسایی نشده

بعد از زمان تشکیل کنگلومرا و سنک آهک در منطقه است. از آنجایی که کنگلومرا اطلاعات زیادی از جمله دگرسانی و کانی سازی در داخل قطعه های خود دارد، پژوهشگران زیادی به اشتباه آن را هم زمان با کانی سازی در نظر می گیرند و این مسئله مشکلات زیادی را در اکتشاف این ذخایر ایجاد می کند.

شیمی محلول: کالکوسیت مهم ترین کانی اولیه مس در سامانه های نوع مانته کالکوسیت است. میزان مس در کالکوسیت ۷۹ درصد و بدون آهن است (جدول ۲ و شکل ۱۴).

کالکوپیریت مهم ترین کانی اولیه کانسارهای مس پورفیری، ماسیو سولفید و سایر است. میزان مس کالکوپیریت ۳۴/۵ درصد و میزان آهن ۳۰/۴ درصد است (جدول ۲). با توجه به این موضوع در برخی از کانسارها در سطح جهانی علاوه بر کالکوسیت، به بورنیت هم اشاره شده است که میزان مس ۶۳/۳۱ درصد و میزان آهن آن ۱۱/۱۳ درصد است (جدول ۲ و شکل ۱۴). با توجه به بالا بودن میزان مس و نبود آهن در کالکوسیت، می توان نتیجه گرفت که در این سامانه ها، محلول فوق العاده غنی از مس و فقیر از آهن است. با توجه به اینکه همراه با کانی سازی کالکوسیت، کوارتز مشاهده نمی شود، می توان نتیجه گیری کرد که محلول گرمابی فقیر از سیلیس است و وجود مواد آلی همراه با کانی کالکوسیت، بیانگر احیایی بودن محلول است (شکل ۱۵).

است. سیمان کنگلومرا نقشی مهم در کانی سازی داشته است. در افق بالایی کنگلومرا با افزایش میزان سیمان آهک عیار مس کاهش یافته است.

کانی اصلی مس در منطقه، کالکوسیت است. کالکوسیت در داخل کنگلومرا به صورت پراکنده و رگچه ای ایجاد شده است. نکته مهم این است که همراه با کالکوسیت، کانی کوارتز مشاهده نمی شود و این بیانگر ناچیز بودن مقدار سیلیس در محلول کانه ساز است.

سنگ آهک معمولاً یک سنگ بسیار واکنش پذیر است و در این کانسار به دلیل شیمی خاص محلول، سنگ آهک برای کانی سازی مفید نبوده؛ زیرا محلول نتوانسته است با سنگ آهک واکنش دهد و فقط وارد کنگلومرا شده و تنها ذرات کوچکی از کالکوسیت را در داخل آهک مشاهده می کنیم.

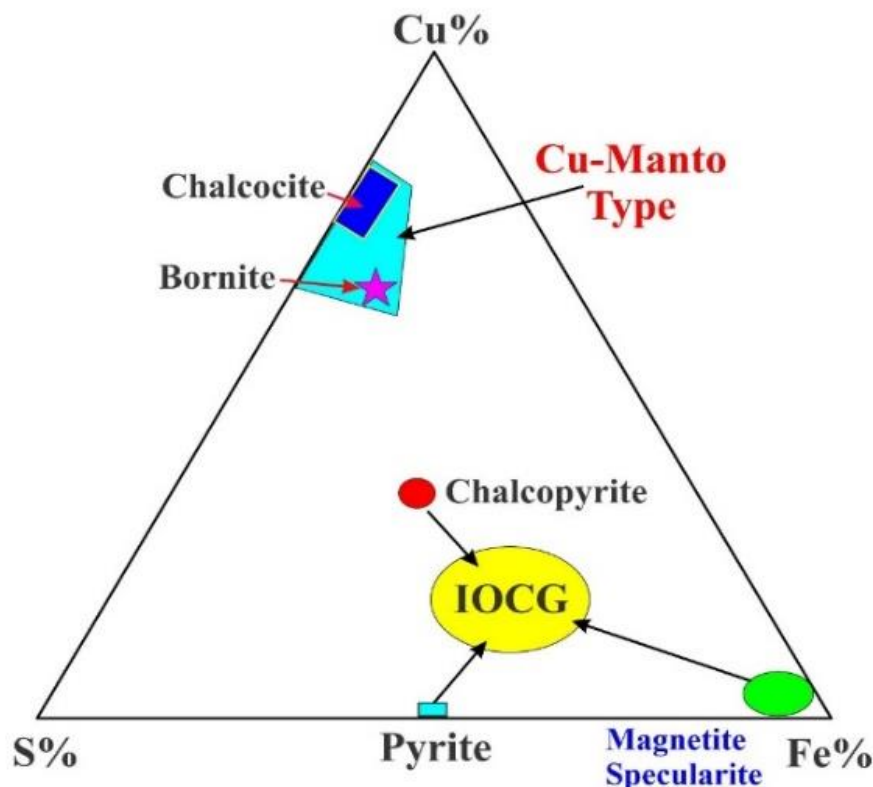
در محدوده زنگالو، کلاته برق و کال ابری، پیریت همراه با رگچه کوارتز مشاهده شده است. از آنجایی که در پاراژنز کالکوسیت، کوارتز موجود نیست و محلول فقیر از سیلیس است، بنابراین پیریت و رگچه کوارتز هیچ ارتباطی زمانی و منشائی با کالکوسیت ندارد و نمی تواند پاراژنز کالکوسیت باشد.

کانی سازی کالکوسیت اغلب در داخل کنگلومراست و فقط بخش بسیار محدودی به صورت ذرات کوچکی در داخل سنگ آهک تشکیل شده است. به طور قطع، زمان تشکیل کانی سازی مربوط به

جدول ۲. مقایسه کانی های مس از نظر میزان آهن و مس

Table 2. Comparison of copper minerals in terms of iron content

Mineral	Cu %	S%	Fe%	O%	CO ₂ %	
Cu ₂ S	79.85	20.15	-	-	-	Chalcocite
Cu ₅ S ₅	78.10	21.9	-	-	-	Digenite
CuS	66.46	35.50	-	-	-	Covellite
Cu ₅ FeS ₄	63.31	25.56	11.13	-	-	Bornite
CuFeS ₂	34.5	35	30.4	-	-	Chalcopyrite
Cu ₂ O	88.82	-	-	11.18	-	Cuprite
CuO	79.89	-	-	20.11	-	Tenorite
Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	57.50	-	-	36.18	20	Malachite
Cu ₂ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55.31	-	-	37.1	25.5	Azurite



شکل ۱۴. سامانه سه تایی، نمایش تغییرات میزان مس، آهن و گوگرد در کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت. نمایش کانی سازی مس مانتو و مس نوع اکسیدهای آهن

Fig. 14. Tertiary system, comparison the Cu, Fe, and S content of chalcocite, bornite, and chalcopyrite minerals. The location of Cu Manto deposit and iron oxide copper type deposit is plotted.

در شکل ۱۴ و شکل ۱۵، کانسارهای مس نوع مانتو و مس نوع همراه اکسیدهای آهن مقایسه شده‌اند و تفاوت اساسی در میزان سیلیس، آهن، میزان مس و شرایط اکسیدان و احیایی گزارش شده است.

پژوهشگران به اشتباه کانی‌هایی مانند کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت را که هیچ ارتباط مکانی و زمانی با کالکوسیت ندارند، به عنوان پاراژنز کالکوسیت معرفی می‌کنند. این کانی‌ها در داخل قطعه‌های کنگلومرا حضور دارند و هیچ رابطه زمانی، مکانی و منشائی با کالکوسیت ندارند. معرفی این کانی‌ها موجب عدم درک صحیح از شیمی محلول کانه‌دار و در نتیجه، به چالش کشیدن منشأ عناصر شده است.

بالا بودن مس، ناچیز بودن آهن و به خصوص ناچیز بودن سیلیس به شکل کوارتز، باعث شده تا نوع مانتو در بین کانسارهای مس، یک نوع کاملاً استثنائی باشد (شکل ۱۴ و شکل ۱۵). در تمامی کانسارهای مس، سیلیس نقشی بسیار مهم در قالب کوارتز دارد که بیش از ۹۰ درصد محلول را تشکیل می‌دهد و در همه کانسارهای مس حضور کانی کالکوپیریت به عنوان کانی اولیه و مهم مس بیانگر حضور آهن در محلول است.

کانسارهای مس همراه با اکسید آهن^{۲۲} از لحاظ شیمی محلول غنی از سیلیس، غنی از آهن (کالکوپیریت- اپیدوت) و فوق اکسیدان (اسپیکولاریت- اپیدوت) هستند (شکل ۱۴ و شکل ۱۵).

Mineralogical & Chemical Composition of **Cu-Manto Types**

Paragenesis: Chalcocite ±Bornite

Alteration: Minor Chlorite & Calcite

Geochemistry: Cu, Fe-Poor, Reducing, Si-Poor

Genesis: Unknown, Host Rocks: Volcanic & Volcano Sedimentary Sequences

Style of Mineralization: Porosity Control (Volcanic Conglomerate, Pyroclastic), Stratabound

Mineralogical & Chemical Composition of **IOCG-Types**

Paragenesis: Chalcopyrite, ±Bornite, Specularite, Magnetite, Pyrite

Alteration: Epidote, Chlorite, Albite, Silicification, ±Potassic

Geochemistry: Cu, Au, ±REE, ±U, Fe-Rich, Highly Oxidizing, Si-Rich

Genesis: I-Type Granitoids

Style of Mineralization: Vein-Types, Skarn & Other Types

MHK 2023

شکل ۱۵. ترکیب شیمیایی محلول گرمابی و پاراژنز در سامانه مس مانتو و مس نوع اکسیدهای آهن

Fig. 15. The chemical composition of the hydrothermal and mineral paragenesis in the Cu manto system and iron oxide copper type deposit.

آتشفشانی حاوی حداقل ۵ درصد مگنتیت اولیه هستند. اگر سنگ آتشفشانی دگرسان شود و بعد محلول ایجاد شود که غنی از مس باشد، این محلول نمی تواند فقیر از سیلیس، آهن، آلومینیم و ... باشد. بنابراین تحت هیچ شرایطی نمی تواند سنگ آتشفشانی منشأ باشد و پژوهشگرانی که این فرضیه را مطرح کرده اند به پاراژنز و شیمی محلول توجه نکرده اند. همچنین در پروفیلی که در محدوده نسیم مورد بررسی قرار گرفت، هیچ نوع دگرسانی شدیدی مشاهده نشد و نمی توان گفت منشأ محلول کانه ساز، سنگ های آتشفشانی هستند.

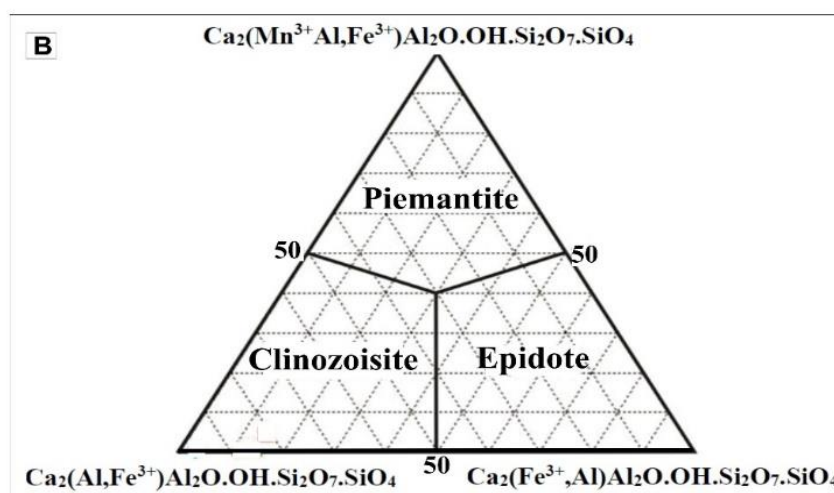
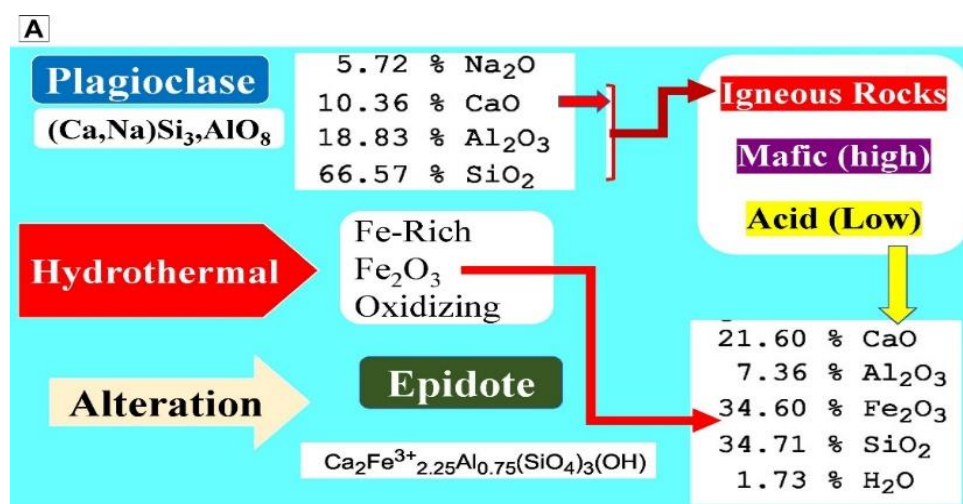
برخی از پژوهشگران توده های نفوذی را به عنوان منشأ این کانسارها مطرح کرده اند (Palacios, 1986; Oliveros et

بر مبنای دگرسانی هم می توان شیمی محلول گرمابی در زمان تشکیل کانسار نوع مانتو را تفسیر کرد. نبود اپیدوت همراه با کالکوسیت (که دارای حداقل ۳۴/۶ درصد آهن در ساختار خود است و آهن آن سه ظرفیتی است که بیانگر حالت اکسیدان و بالا بودن میزان آهن در محلول است)، دلیل مهمی بر فقیر بودن محلول از آهن و شرایط احیای محلول کانه دار است (شکل ۱۶-A و B).

منشأ کانسارهای مس مانتو: در ارتباط با منشأ کانسارهای نوع مانتو، نظریه های مختلفی بیان شده است و برخی از دانشمندان منشأ آتشفشانی را پیشنهاد داده اند (Tosdal and Munizaga, 2003; Wilson and Zentilli, 2006). معمولاً این سنگ های

برای تعیین منشأ این سامانه‌ها، بررسی‌های ایزوتوپی در دنیا بر روی گوگرد انجام شده است. مغفوری و همکارانش (Maghfouri et al., 2017)، کانسارهای نوع مانتو در ایران را از نظر مقدار ایزوتوپ گوگرد با کانسارهای نوع مانتو در شیلی مقایسه کرده‌اند (شکل ۱۷). در این پژوهش، مقادیر متفاوتی از میزان گوگرد در کانسارهای مختلف به دست آمده است. بنابراین بررسی‌های ایزوتوپی برای تعیین منشأ نتیجه مطلوبی در پی نخواهد داشت.

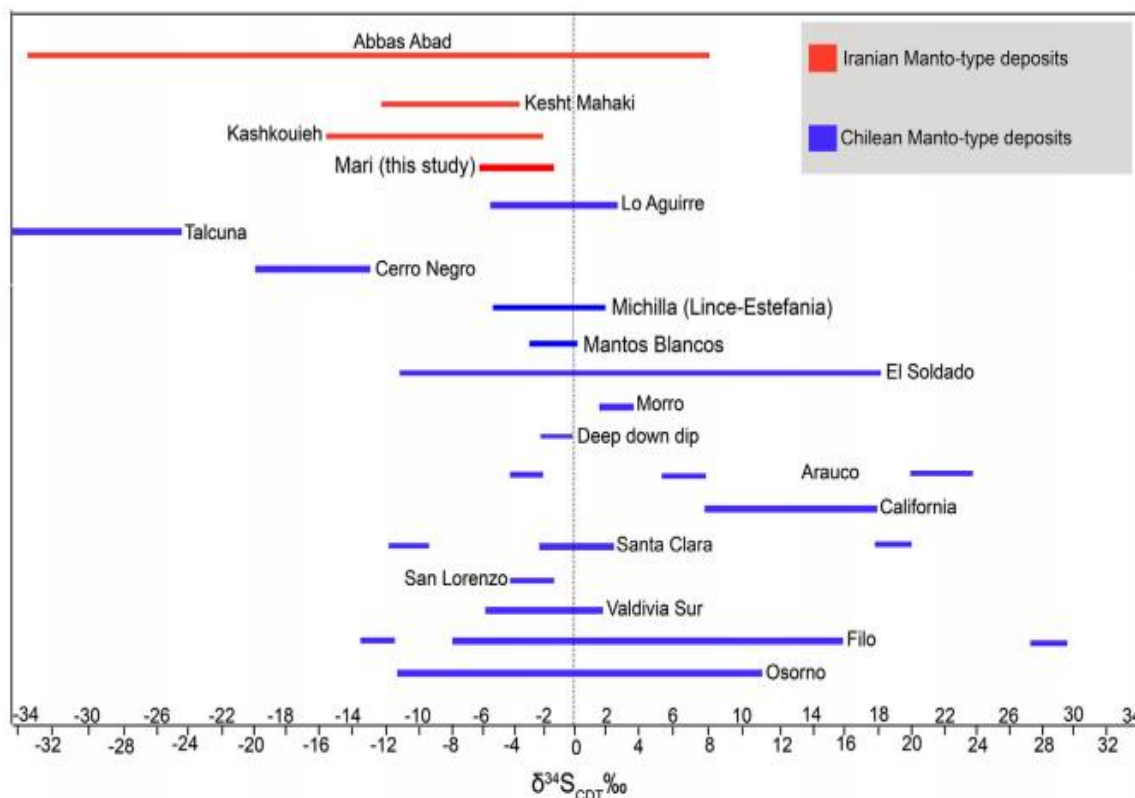
در حالی که اگر منشأ توده‌های نفوذی باشد که در عمق است، محلولی که منشأ ماگمایی دارد، به طور قطع، غنی از سیلیس، آهن و آلومینیم است و معمولاً علاوه بر مس می‌تواند حاوی عناصری مثل سرب و روی نیز باشد. این در تضاد با شیمی محلول و پاراژنز کالکوسیت در این سامانه‌هاست؛ لذا برای بررسی و تعیین منشأ این نوع کانسارها باید موارد دیگری مورد بحث و بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۶. A: ترکیب شیمیایی و نحوه تشکیل کانی اپیدوت و B: فرمول شیمیایی گروه اپیدوت و ترسیم کانی‌های آن با ترکیب‌های مختلف بر روی نمودار

Fig. 16. A: Chemical composition and mechanism of formation of epidote, and B: The Epidote group minerals are plotted within ternary diagram

S. Maghfouri et al. / Ore Geology Reviews 81 (2017) 10–22



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ برای کانسارهای مس نوع مانتو ایران (Boveiri et al., 2013; Abolipour et al., 2015; Maghfouri et al., 2017) با کانسارهای نوع مانتو در شیلی (Sasaki et al., 1984; Spiro and Puig, 1988; Munizaga and Zentilli, 1994; Vivallo and Henríquez, 1998; Saric et al., 2003; Wilson et al., 2003; Wilson and Zentilli, 2006)

Fig. 17. Comparison of $\delta^{34}\text{S}$ values for Iranian copper Manto-type deposits (Boveiri et al., 2013; Abolipour et al., 2015; Maghfouri et al., 2017) with Chilean Manto-type deposits (Sasaki et al., 1984; Spiro and Puig, 1988; Munizaga and Zentilli, 1994; Vivallo and Henríquez, 1998; Saric et al., 2003; Wilson et al., 2003, Wilson and Zentilli, 2006)

نتیجه گیری

تشکیل شده است و به سمت افق بالاتر به آهک تبدیل می شود. به سمت آهک تعداد قطعه ها کمتر و اندازه آنها کوچک تر است. زمان تشکیل کنگلومرا بر اساس نومولیت موجود در سنگ کربناته، مربوط به پالئوسن و اتوسن است. دگرسانی های مهم در ارتباط با کانی سازی در محدوده نسیم شامل کلریت، زئولیت و کلسیت است. قطعه های مونزونیت و دیوریت پورفیری موجود در کنگلومرا حاوی اپیدوت و کلریت هستند

واحدهای سنگی در محدوده نسیم شامل توالی از مجموعه سنگ های آتشفشانی با ترکیب ابتدا بازالت و سپس آندزیت بازالت و آندزیت در منطقه است که در محیط غیر دریایی ایجاد شده است و پس از پایان فعالیت آتشفشانی فرسایش صورت گرفته و کنگلومرایی رسوبی با قطعه های بیشتر آتشفشانی تشکیل شده است. سیمان کنگلومرا ابتدا از پودر و قطعه های خرد شده آندزیت

می توان نتیجه گیری کرد که محلول گرمابی فقیر از سیلیس است و حضور مواد آلی، بیانگر احیایی بودن محلول است.

نبودن اپیدوت همراه با کالکوسیت که دارای آهن بالایی در ساختار خود است و بیانگر حالت اکسیدان است، فقیر بودن محلول از آهن و شرایط احیای محلول کانه دار را تأیید می کند.

سنگ های آتشفشانی حاوی دست کم ۵ درصد مگنتیت اولیه هستند و اگر منشأ باشند، باید محلولی ایجاد شود که غنی از آهن باشد؛ در حالی که در محدوده، شواهدی از کانی های آهن دار مانند کالکوپیریت و پیریت وجود ندارد. بنابراین با هیچ شرایطی نمی تواند سنگ آتشفشانی منشأ باشد و همچنین این سنگ ها در منطقه دگرسان نشده اند.

اگر منشأ، توده های نفوذی باشد، محلولی که منشأ ماگمایی دارد، به طور قطع، غنی از سیلیس، آهن و آلومینیم است؛ در حالی که همراه با کالکوسیت، کوارتز مشاهده نشد و این بیانگر فقیر بودن محلول از سیلیس است. تعیین منشأ این نوع کانسارها نیاز به بررسی بیشتری دارد و باید موارد دیگری مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

دگرسانی پروپلیتیک که این دگرسانی ها فقط مختص توده نفوذی است و ارتباطی با سنگ های آتشفشانی ندارد.

در کل پنجره بردسکن از جمله نسیم، کانی سازی به شکل کالکوسیت فقط در داخل کنگلومرا که دارای تخلخل مفید بوده، رخ داده است. در این سامانه محلول از طریق گسل بالا آمده و در کنگلومرا باعث کانی سازی شده است و به دلیل شیمی محلول خاص، تنها ذرات کوچکی از کالکوسیت را در داخل آهک مشاهده می کنیم. زمان تشکیل کانی سازی، مربوط به بعد از زمان تشکیل کنگلومرا و سنگ آهک در منطقه است.

کانی اصلی مس در منطقه، کالکوسیت است و همراه با کالکوسیت، کانی کوارتز مشاهده نمی شود و این بیانگر ناچیز بودن مقدار سیلیس در محلول کانه ساز است. کالکوسیت مهم ترین کانی اولیه مس در سامانه های نوع مانتو است که دارای میزان مس بالا و بدون آهن است؛ در حالی که کالکوپیریت مهم ترین کانی اولیه کانسارهای مس پورفیری؛ ماسیو سولفید و سایر است که میزان مس کمتر و درصد آهن بالایی دارد. با توجه به این بالا بودن میزان مس و نبود آهن در کالکوسیت، می توان نتیجه گرفت که محلول در این سامانه ها فوق العاده غنی از مس و فقیر از آهن است و همچنین با توجه به نبود کوارتز به همراه کالکوسیت،

1. Manto type
2. Stratabound
3. Talcuna
4. Cerro Negro
5. Stacked tabular
6. Buena Esperanza
7. Lince Estefanía
8. Mantos Blancos
9. Elsoldado
10. Coastal Cordillera
11. Uchumi

12. Volcanic Red Bed
13. Kenawee
14. Michilla
15. La Negra
16. Boleo
17. Basal
18. Lorena
19. Tocopilla-Taltal
20. Anticline
21. Syncline
22. Iron oxide copper gold ore deposits (IOCG)

References

- Abolipour, M., Rastad, E. and Rashidnejadomran, N., 2015. Manto-type copper mineralization in pyrobitumen-bearing porphyritic andesite, Koshkouieh district of Rafsanjan, Dehaj-Sardoie subzone. *Geoscience*, 24(95): 123–144. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42418>
- Amini zahan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2020. Geology, Mineralogy and Geochemistry in Kimia Mining Area, Northwest of Bardaskan. 12th National Conference of Economic Geology Association, Bo Ali Sina University, Hamadan, Iran. Retrieved April 18, 2023 from <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1080963.html>
- Alizadeh, V., Momenzadeh, M. and Emami, M. H., 2012. Petrography, Geochemistry, Mineralogy, Fluid Inclusions and Mineralization Study of Vorezg- Qayen Copper Deposit. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(86): 47-58. <https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54056>
- Boveiri Konari, M., Rstad, E., Kojima, S. and Rashidnejad Omran, N., 2013. Volcanic redbed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 190(2): 107–121. Retrieved April 18, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/264972581>
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 2002. The geology of the El Soldado Manto type Cu (Ag) deposit, central Chile, In T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. PGC Publication, Adelaide, Australia: 2: 185-205. Retrieved April 19, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/303374319>
- Cabral, A.R. and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Mineralium Deposita*, 42(8): 901–912. Retrieved April 18, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/225330930>
- Camus, F., 1990. Geological characteristics of stratabound deposits associated with lacustrine sediments, central Chile. *Mineral Depos*, 8: 449–462. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88282-1_34
- Ebrahimi, S., Arab Amiri, A.R. and Ghanbari, H., 2018. Mineralogical Studies, Alteration, Fluid Intermediates and Stable Isotopes of Sharif Abad Copper Deposit, Bardaskan, North-East of Iran. *Earth Science Quarterly*, 30(117): 135-146. Retrieved April 15, 2023 from <https://www.sid.ir/paper/392210/fa>
- Eftekharnjad, J., Aghanabati, A. and Hamzehpour, B., 1976. 1:250000 Kashmar geological map. Geological Survey and Mining Exploration of Iran.
- Entezarab, A., 2018. Geology, Mineralogy, Geochemistry and Geophysical Data Interpretation of Ternam Copper Mine, North-West of Bardaskan. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 171 pp.
- Entezari Harsini, A., Mazaheri, S.A., Saadat, A. and Santos, J., 2017. U-Pb Geochronolog, Sr-Nd Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic setting of Gandab volcanic rocks, Northeastern Iran. *Geochronometria*, 44(1): 269–286. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0061>
- Ghelichkhani, M. and Malakzadeh Shafaroudi, A., 2018. Geology, alteration, mineralization, geochemistry of Zangalou copper mine area. 10th National Symposium of Economic Geology of Iran, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian) Retrieved April 20, 2023 from <https://conf.ui.ac.ir/fa/article.php?rId=104&cnfId=9>
- Ghelichkhani, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Hommam, M., 2021. Petrography, geochemistry and tectonic setting of NW Bardaskan volcanic rocks: a case study of Zangalou mine, *Petrological Journal*, 12(2): 1-22. <https://doi.org/10.22108/ijp.2021.125200.1204>
- Ghelichkhani, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Homam, S.M., 2023. Zangalou Manto-type deposit in the Sabzevar zone, northeast Iran: Evidence of mineralogy, geochemistry, U–Pb dating, fluid inclusion, and stable isotopes. *Geological Journal*, 58(1): 465–496.

- <https://doi.org/10.1002/gj.4607>
- Herazo, A., Reich, M., Barra, F., Morata, D., Real, I. and Pagès, A., 2020. Assessing the role of bitumen in the formation of stratabound Cu-(Ag) deposits: Insights from the Lorena deposit, Las Luces district, northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 124: 103639. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103639>
- Jabbari, E., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2017. Kalabri stratabound (manto-type) copper deposit in Eocene volcanic-sedimentary complex of NW Bardaskan, NE Iran. *Advanced Applied Geology*, 7(1): 1–19. (in Persian) <https://doi.org/10.22055/AAG.2017.13066>
- Jonidi, A. and Fardost, F., 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis pattern of Rizab copper deposit, northwest of Bardaskan, Razavi Khorasan province, M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 185 pp.
- Karimpour, M.H., Rezai, R., Zarasondi, A. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2021. Saveh-Nain-Jiroft Magmatic Belt replaces Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt: Investigation of genetic relationship between porphyry copper deposits and adakitic and non-adakitic granitoids. *Journal of Economic Geology*, 13(3): 465-506. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V13I3.1034>
- Klohn, E., Holmgren, C. and Ruge, H., 1990. El Soldado, a strata-bound copper deposit associated with alkaline volcanism in the central Chilean Coastal Range. *Mineral Deposits*, 8: 435–448. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88282-1_33
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. and Hayashi, K., 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38: 208–216. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0304-5>
- Kojima, S., Trista, D., Guilera, A. and Ken-ichiro ayashi, H., 2009. Genetic Aspects of the Manto-type Copper Deposits Based on Geochemical Studies of North Chilean Deposits. *Resource Geology*, 59(1): 87–98. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00081.x>
- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M., Movahednia, M. and Choulet, F., 2017. Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran. *Ore Geology Reviews*, 81(1): 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.025>
- Maghfouri, S. and Movahednia, M., 2015. Investigation of geology and mineralization of Abbas Abad copper deposit and camper with Mantotype deposit. 18th Symposium on Iranian Geosciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (in Persian) Retrieved April 19, 2023 from <https://civilica.com/doc/391458/download>
- Mahvashi, M. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Cheshmegaz (Nasim) copper deposit, NW Bardaskan, mineralogy, alteration, geochemistry and model determining. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 24(3): 41–434(in Persian). Retrieved April 19, 2023 from <http://ijcm.ir/article-1-76-fa.html>
- Munizaga, F. and Zentilli, M., 1994. Sulfur Isotope Characterization of Stratabound Copper Deposits in Chile. *University of Chile, Santiago, Chile*, 45: 127–134. Retrieved April 15, 2023 from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950400981914880>
- Najmi, F., Mazaheri, S.A., Saadat, S. and Entezari, A., 2017. Geology, alteration, mineralization and geochemical study in copper mine, Golcheshmeh Area, South of Neyshbour. *Iranian Journal of Geology*, 11(43): 27-44. (in Persian) Retrieved April 18, 2023 from <https://rimag.ricest.ac.ir/en/Article/Download/9505>
- Nishihara, H., 1957. Origin of the “Manto” Copper deposits in lower California, Mexico. *Economic Geology*, 52(8): 944–951. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.52.8.944>
- Oliveros, V., Feraud, G., Aguirre, L., Ramirez, L., Fornary, M. and Palacios, C., 2008. Detailed ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile, *Mineralium Deposita*, 43: 281–293. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0146-2>

- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. and Oyarzun, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita*, 33: 547–559. <https://doi.org/10.1007/s001260050171>
- Palacios, C., 1986. Subvolcanic copper deposits in the coastal range of northern Chile. *Journal for Geology and Palaeontology*, 1985(9-10): 1605–1615. https://doi.org/10.1127/zbl_geol_pal_1/1985/1986/1605
- Qaemi F. and Mousavi Harami R., 2006, map 1:100000, Iran Geological and Mineral Exploration Organization.
- Ramírez, L.E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M.A., Sial, A.N., Fernandez-Turiel, J.L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M. and Lehmann, B., 2006. The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. *Mineralium Deposita* 41: 246–258. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0055-9>
- Ruiz, C., Aguilar, A., Egert, E., Espinoza, W., Puebles, F., Quezada, R. and Serrano, M., 1971. Strata-bound copper sulphide deposits of Chile. *Society of Mineralogy and Geology of Japan*, 3(3): 252–260. Retrieved April 18, 2023 from https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201602002399151546
- Saric, N., Kreft, C. and Huete, C., 2003. Geología del yacimiento Lo Aguirre, Chile. *Revista geológica de Chile*, 30(2): 317–331. Retrieved April 15, 2023 from <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082003000200010>
- Sasaki, A., Ulriksen, C.E., Sato, K. and Ishihara, S., 1984. Sulfur isotope reconnaissance of porphyry copper and manto-type deposits in Chile and the Philippines. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. 35: 615–622. Retrieved April 20, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/291839946>
- Sato, T., 1984. Manto type copper deposits in Chile, a review. *Bulletin of the geological survey of Japan*, 35(11): 565–582. Retrieved April 15, 2023 from https://www.gsj.jp/data/bull-gsj/35-11_04.pdf
- Shafaii Moghadam, H., Zaki Khedr, M., Arai, S., Stern, R.J., Ghorbani, G., Tamura, A. and Ottley, C.J., 2015. Arc-related harzburgite–dunite–chromitite complexes in the mantle section of the Sabzevar ophiolite, Iran: a model for formation of podiform chromitites. *Gondwana Research*, 27(2): 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.007>
- Shahrabi, M. Hosseini, M. and Shabani, K., 2006, geological map 1:100000 Bardaskan, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran.
- Soltani, A. and Fardost, F., 2016. Mineralogy, geochemistry and genesis of Abri copper deposit, Dari and Cheshme Marzieh, northwest of Doruneh. M.Sc, Thesis, Shahrood University of Technolog, Shahrood, Iran, 212 pp.
- Spiro, B. and Puig, A., 1988. The source of sulphur in polymetallic deposits in the Cretaceous magmatic arc, Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(3): 261–266. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(88\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90004-1)
- Tosdal, R.M. and Munizaga, F., 2003. Lead sources in Mesozoic and Cenozoic Andean ore deposits, north-central Chile (30–34S). *Mineralium Deposita*, 38: 234–250. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0307-2>
- Vivallo, W. and Henríquez, F., 1998. Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista geológica de Chile*, 25(2): 199–228. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02081998000200006>
- 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>
- Wilson, N.S.F., 1998. The role of petroleum in the formation of the El Soldado copper deposit, Chile: Hydrothermal replacement of a biodegraded petroleum reservoir. Ph.D. thesis, Dalhousie University, Halifax, Canada: 418 pp.
- Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 1999. The role of organic matter in the genesis of the El Soldado

- volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Economic Geology*, 94(7): 1115–1136. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.7.1115>
- Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 2006. Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chil. *International Journal of Coal Geology*, 65(1-2): 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.04.012>
- Wilson N.S.F., Zentilli, M. and Spiro B., 2003. A Sulfur, Carbon, Oxygen, and Strontium Isotope Study of the Volcanic-Hosted El Soldado Manto-Type Copper Deposit, Chile, The Essential Role of Bacteria and Petroleum. *Economic Geology*, 98(1): 163–174. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.163>
- Zentilli, M., 1974. Geological Evolution and Metallogenetic Relationships in the Andes of Northern Chile Between 26° and 29° South. Ph.D. thesis - Queen's University, Kingston, Canada, 317 pp. Retrieved April 20, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/284939021>
- Zentilli, M., Munizaga, F. Graves, M.C., Boric, R., Wilson, N.S.F., Mukhopadhyay, P.K. and Snowdon, L.T., 1997. Hydrocarbon involvement in the genesis of ore deposits: an example in Cretaceous strata-bound (manto-type) copper deposits of central Chile. *International Geology Review* 39(1): 1–21. <https://doi.org/10.1080/00206819709465257>