



Research Article

Investigations of sulfide-gold mineralization and fluid inclusions in the Nabijan area, southwest of Kaleibar, East-Azarbaidjan province

Fatemeh Arbati Gonbari¹, Ghahraman Sohrabi² * , Seyed Ghafoor Alavi¹, Ali Asghar Calagari¹

1-Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2-Department of geology, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 28 Apr 2025 Accepted: 12 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

The Nabijan region is located 20 km southwest of Kalybar in East Azerbaijan Province and in northwest Iran. According to the divisions of Iranian structural zones (Aghanabati, 2004), this region is considered a part of the western part of the Alborz-Azerbaijan magmatic belt and is metallogenically located in the Ahar-Arasbaran metallogenic zone (Castro et al, 2013). The Ahar-Arasbaran metallogenic zone is one of the most important and richest metallogenetic zones, especially for gold, copper and molybdenum, in the northwest and Iran (Jamali et al, 2012). So far, numerous geological studies have been carried out by various researchers on geochemistry, mineralogy and alteration in the Arasbaran zone and around the Nabijan region. Based on exploration studies conducted by Shekouei (2003), a promising area for gold and copper elements has been introduced in Nabi Jan. Based on the aforementioned studies (trenching and boring) by the Geological and Mineral Exploration Organization of the country, about 300 thousand tons of gold ore have been estimated in silica zones and veins with an average grade of 1.37 grams per ton. Previous researchers have conducted studies on geology, geochemistry, mineralization and alteration in the Nabi Jan region. In this paper, an attempt has been made to describe the geological, mineralization and alteration characteristics of the Nabi Jan region, and to conduct new studies for the first time based on fluid intermediates in quartz-sulfide veins - veinlets in order to determine the physicochemical conditions of mineralizing fluids and the genesis of the deposit.

Materials and Methods

This research consists of two parts: field and laboratory investigations. In field studies, mineralized veins were identified and their relationship with host rocks and alteration zones was investigated, and samples were taken for laboratory studies. In this regard, 60 samples were collected from host rock units and mineralizing outcrops. During laboratory studies, 20 thin sections and 5 polished sections were prepared and subjected to petrographic and mineralographic studies at the University of Tabriz. In order to understand the physicochemical nature of the mineralizing fluid and to investigate the process of chemical and temperature changes of mineralizing fluids during ore deposition, petrographic and thermometric studies of fluid intercalations were carried out on 5 samples containing quartz crystals cognate with sulfide mineralization and gold (taken from quartz veins). Thermometric measurements were performed using a Linkam THMSG600 fluid interface device connected to an OLYMPUS BX-51 microscope with LD-LensX40 and equipped with a TMS94 thermal controller and LNP cooler at Payam Noor University of Tabriz.

Citation: Arbati Gonbari, F. et al, 2025. Investigations of sulfide-gold mineralization and fluid inclusions in the Nabijan area, *Res. Earth. Sci.* 16(3), (113-132) DOI: 10.48308/esrj.2025.232378.1190

* Corresponding author E-mail address: q_sohrabi@uma.ac.ir



The temperature range of the device is -190 (by liquid nitrogen) to +600 (by electrical energy) °C. Calibration of the device during the heating stage was performed with an accuracy of ± 0.6 °C at +414 °C (melting temperature of cesium nitrate) and ± 0.2 °C at -94.3 °C (melting temperature of n-hexane). The salinity of the fluid interfaces was calculated in terms of weight percent equivalent to common salt (wt% NaCl eq.) using the melting temperature of the last ice piece (T_{mice}) and using the equation (Hall et al, 1988).

Geology and Mineralization

The study area is part of the Lesser Caucasus-Arasbaran metallogenic zone. Magmatism in this metallogenic zone began during the Late Cretaceous and continued into the Cenozoic and Quaternary. Mineralization in this zone is mostly related to Cenozoic magmatic rocks. Cenozoic magmatic activities in the Arasbaran zone have led to the formation of alkaline to calc-alkaline plutons with porphyry, skarn, and epithermal mineral systems. The exposed rocks in the Nabi Jan area mostly consist of Cretaceous volcanic and sedimentary units that have been intruded by Oligocene intrusive masses with quartz-monzodiorite composition. Intrusive masses with dioritic to monzodiorite composition are the main factor of epithermal gold-silver mineralization in the Nabi Jan area and its surroundings from around the villages of Paigham and Alawiq to Jundshafq and Marzrud. Alteration zones around gold veins and zones in the Nabijan region include silicic, phyllic, and propolite types that extend to dimensions of 1 to 20 meters. Mineralization in the studied area has occurred in the form of stockwork and quartz veinlets-veins within the quartz monzodiorite host rock, which include sulfide minerals (pyrite, chalcopyrite, galena, and sphalerite) and native gold. Pyrite and chalcopyrite have been transformed into iron hydroxides (goethite and limonite) as a result of supergene processes. Quartz crystals within the quartz veinlets-veins exhibit comb and void-filling textures. Also, bipyramidal shape is common in crystalline quartz in this region. Based on the studies of the fluids involved, the homogenization temperature and salinity values of the fluid interlayers vary between 170 and 282 °C and 3.27 to 8.51% by weight of table salt, respectively. Based on the findings of the fluid interlayers, the boiling process is the most important process in the deposition of sulfide minerals and gold, and sulfide complexes have played a major role in the transport of ore elements. Based on the geological characteristics, mineralogical, structure, texture, and homogenization temperature and salinity values of the fluid interlayers, the Nabijan sulfide-gold mineralization can be classified as a low-sulfidation epithermal deposit.

Results and Discussion

Based on the studies conducted, the rock units exposed in the Nabijan region include Cretaceous volcanic and sedimentary rocks and Oligocene intrusive rocks. The Cretaceous volcanic and sedimentary rocks are cut by the Oligocene quartz-monzodiorite intrusion. The main minerals of this rock unit are plagioclase, potassium feldspar, and quartz, and its accessory minerals are biotite, amphibole, dark minerals, and rarely clinopyroxene. In the altered areas, most hornblens have been transformed into biotite and biotites into chlorite. The activity of hydrothermal fluids resulting from the intrusion has caused the formation of various siliceous, phyllic, and propolite alterations in the host rock. As a result of the passage of hydrothermal fluids along the fractured and faulted zones, while altering the quartz-monzodiorite host rock, it has caused the formation of stony zones and silica veins-veins. Gold-bearing silica veins and veins contain pyrite and small amounts of chalcopyrite, sphalerite and galena. Natural gold of 2 to 5 microns is observed in the altered parts of pyrite to iron hydroxide (goethite) in polished sections. Petrographic and thermometric studies of fluid intercalations were carried out inside coarse quartz crystals. Quartz crystals in these vein-veins show co-growth and twinning with sulfide minerals and gold. Fluid intercalations have polyhedral, elongated, acicular, spherical and negative crystal shapes and are observed as primary, secondary and pseudo-secondary intercalations from a paragenetic point of view. The size of the fluid interlayers varies from 10 to 24 microns. The studied fluid interlayers can be divided into 4 types: (1) two-phase liquid-vapor (L+V), (2) two-phase vapor-liquid (V+L), (3) single-phase vapor (V), and (4) single-phase liquid (L). The frequency of two-phase liquid-rich interlayers is higher than the other interlayers. Thermometric studies were carried out on two-phase liquid-rich interlayers during two cooling and heating stages. The range of homogenization temperatures for two-phase liquid-rich interlayers was between 170 and 282 °C. Based on the values of these temperatures, the salinity of the two-phase liquid-rich interlayers ranges from 3.27 to 8.51 with an average of 75.5% by weight equivalent to table salt. Based on the bivariate plot of salinity versus homogenization temperature, the points corresponding to the thermometry findings of the fluid intercalations at Nabijan show a trend of approximately threefold increase in salinity (from 3.2% to 8.5%) accompanied by a significant decrease in temperature (from 282°C to 170°C), which is somewhat similar to the boiling trend. Also, the presence of single-phase liquid intercalations could indicate that the activity of hydrothermal fluids continued down to temperatures below 70°C. The ice melting temperatures range from -2 to -5.5°C, which


correspond to salinities between 3.27 and 8.51% by weight of table salt. The homogenization temperature-salinity trend is consistent with the boiling of ore-forming fluids. It seems that the deposition of sulfides and gold occurred during the same boiling process. Considering the average homogenization temperatures and salinities of the fluid interlayers and using the diagram of fluid interlayer pressure (during homogenization) versus homogenization temperature, the minimum fluid pressure during the deposition of waste and ore minerals was about 25 bar. Considering the occurrence of fluid boiling, this pressure should be considered hydrostatic, which is equivalent to a depth of about 250 meters. This depth can be considered as the lowest depth of sulfide and gold mineralization in the Nabijan area. According to the temperature-salinity diagram (Wilkinson, 2001), sulfide-gold mineralization in the Nabijan area is in the epithermal range.

Conclusion

Mineralization in the Nabijan area occurred in the form of stockwork and quartz veinlets within the quartz monzodiorite host rock. The epithermal gold mineralization agent is most likely a buried intrusive mass from which only the silica veins and veinlets originating from it were able to cut the quartz monzodiorite mass. Silicic, phyllic and propolite alterations have developed around the quartz veinlets. The quartz veinlets contain sulfide mineralization (pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite) and native gold, and the quartz crystals within these veinlets show comb and void-filling textures. The homogenization temperature of the two-phase fluid interlayers present in the mineralized quartz is in the range of 170 to 282 with the highest frequency between 170 and 210 °C. The geological characteristics, structure, and texture of mineralization and alteration zones, along with microthermometric findings in the Nabi Jan area, are consistent with low-temperature epithermal gold mineralization.

Keywords: Sulfide-gold mineralization, Fluid inclusions, Epithermal, Nabijan, East-Azarbaidjan.

مطالعات زمین شناسی، دگرسانی و میانبرهای سیال در زونهای کانه زایی سولفیدی و طلای نبی جان، شمال تبریز، استان آذربایجان شرقی

فاطمه اربطی گنبری^۱، قهرمان سهرابی^{۲*} , سید غفور علوی هسجین^۱، علی اصغر کلاگری^۱

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

چکیده گسترده

مقدمه

منطقه نبی جان در فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب غرب کلیبر در استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب ایران قرار دارد. طبق تقسیمات پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 2004) این منطقه جزئی از بخش غربی کمربند ماگمایی البرز- آذربایجان محسوب می‌شود و از نظر متالوژنی در پهنه فلززایی اهر- ارسباران قرار گرفته است (Castro et al, 2013). پهنه فلززایی اهر- ارسباران یکی از مهم‌ترین و غنی‌ترین پهنه‌های فلززایی بویژه برای عناصر طلا، مس و مولیبدن در شمال غرب و ایران است (Jamali et al, 2012). تاکنون پژوهش‌های زمین‌شناسی متعددی در خصوص ژئوشیمی، کانه‌زایی و دگرسانی در زون ارسباران و پیرامون منطقه نبی جان توسط محققین مختلف صورت گرفته است. بر اساس مطالعات اکتشافی صورت گرفته توسط شکویی و پیرامون (Shekouei, 2003) یک منطقه امیدبخش برای عناصر طلا و مس در نبی جان معرفی شده است. بر اساس مطالعات مذکور (حفر ترانشه و گمانه) توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، حدود ۳۰۰ هزار تن کانسنگ طلا در زون‌ها و رگه‌های سیلیسی با عیار متوسط ۱/۳۷ گرم در تن تخمین زده شده است. محققین قبلی بیشتر در خصوص زمین‌شناسی، ژئوشیمی، کانی‌سازی و دگرسانی در منطقه نبی جان مطالعاتی انجام داده‌اند. در این نوشتار سعی شده است ضمن توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و دگرسانی در منطقه نبی جان، مطالعات جدیدی برای اولین بار بر اساس میانبرهای سیال موجود در رگه -رگچه‌های کوارتزی- سولفیدی به منظور تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز و وزن کانساز انجام گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. در مطالعات صحرایی، رگه‌های کانه‌دار شناسایی شد و چگونگی ارتباط آنها با سنگ‌های میزبان و پهنه‌های دگرسانی مورد بررسی قرار گرفت و نمونه‌برداری از آنها برای بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شد. در این راستا ۶۰ نمونه از واحدهای سنگی میزبان و رخنمون‌های کانه‌زایی برداشت شد. در طی مطالعات آزمایشگاهی، ۲۰ مقطع نازک و ۵ مقطع صیقلی تهیه گردید و در دانشگاه تبریز مورد بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری قرار گرفت.

استناد: اربطی گنبری، ف. و همکاران، ۱۴۰۴. مطالعات زمین شناسی، دگرسانی و میانبرهای سیال در زونهای کانه زایی سولفیدی و

طلای نبی جان، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۳)، (۱۳۲-۱۱۳)، DOI: 10.48308/esrj.2025.232378.1190

E-mail: q_sohrabi@uma.ac.ir

* نویسنده مسئول:



به منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و بررسی روند تغییرات شیمی و دمای سیالات کانه‌ساز در طی نهشت کانسنگ‌ها، مطالعات سنگ‌نگاری و حرارت‌سنجی میانبارهای سیال بر روی ۵ نمونه حاوی بلورهای کوارتز همزاد با کانه‌زایی سولفیدی و طلا (برداشت شده از رگه‌های کوارتزی) انجام شد. اندازه‌گیری‌های حرارت‌سنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال Linkam مدل THMSG600 متصل به میکروسکوپ OLYMPUS مدل BX-51 دارای LD-LensX40 و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در دانشگاه پیام نور تبریز انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۰- (توسط نیتروژن مایع) تا ۶۰۰+ (توسط انرژی الکتریکی) درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه سانتی‌گراد در دمای ۴۱۴+ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب نیترات سزیم) و ± 0.2 درجه سانتی‌گراد در دمای ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب n-هگزان) انجام شد. میزان شوری میانبارهای سیال بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام (wt% NaCl eq) با استفاده از دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tmice) و با بهره‌گیری از رابطه (Hall et al, 1988) محاسبه گردید.

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

منطقه مورد مطالعه بخشی از زون متالوژنی قفقاز کوچک- ارسباران می‌باشد. ماگماتیسم در این پهنه فلززایی طی کرتاسه پسین شروع شده و تا سنوزوئیک و کواترنری ادامه یافته است. کانه‌زایی در این پهنه اغلب وابسته به سنگ‌های ماگمایی سنوزوئیک است. فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک در زون ارسباران منجر به تشکیل پلوتون‌های آلکان تا کالک‌آلکان همراه با سیستم‌های کانیاپی پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال شده است. سنگ‌های برونزد یافته در منطقه نبی جان اغلب شامل واحدهای آتشفشانی و رسوبی کرتاسه هستند که توسط توده‌های نفوذی الیگوسن با ترکیب کوارتزومونوزودیوریتی مورد هجوم قرار گرفته‌اند. توده‌های نفوذی با ترکیب دیوریتی تا مونوزودیوریتی عامل اصلی کانی‌سازی طلا- نقره اپی‌ترمال در منطقه نبی جان و پیرامون آن از حوالی روستای پیغام و علویق تا جندشفق و مرز رود می‌باشد. پهنه‌های دگرسانی در اطراف رگه‌ها و زون‌های طلادار در منطقه نبی‌جان شامل انواع سیلیسی، فیلیک و پروپلیتیک هستند که به ابعاد ۱ تا ۲۰ متر گسترش یافته‌اند. کانه‌زایی در منطقه مورد بررسی به صورت استوک‌ورک و رگه- رگچه‌های کوارتزی در داخل سنگ میزبان کوارتزومونوزودیوریتی رخ داده است که شامل کانی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و طلا طبیعی هستند. پیریت و کالکوپیریت در اثر عملکرد فرآیندهای سوپرژن به هیدرواکسیدهای آهن (گوتیت و لیمونیت) تبدیل شده‌اند. بلورهای کوارتز در داخل رگه- رگچه‌های کوارتزی، بافت‌های شانه‌ای و پرکننده فضای خالی را به نمایش می‌گذارند. همچنین شکل بی‌پیرامیدال در کوارتزهای بلورین این منطقه متداول است. بر اساس مطالعات سیالات درگیر مقادیر دمای همگن شدن و شوری میانبارهای سیال به ترتیب بین ۱۷۰ تا ۲۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۳/۲۷ تا ۸/۵۱ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر هستند. بر اساس یافته‌های میانبارهای سیال، فرآیند جوشش مهمترین فرآیند در نهشت کانی‌های سولفیدی و طلا بوده و کمپلکس‌های سولفیدی نقش عمده‌ای در حمل و نقل عناصر کانسنگی ایفا نموده‌اند. بر پایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت، بافت و مقادیر دمای همگن شدن و شوری میانبارهای سیال، کانه‌زایی سولفیدی- طلای نبی‌جان را می‌توان در زمره ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین قرار داد.

نتایج و بحث

بر اساس مطالعات انجام شده، واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه نبی‌جان شامل سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه و سنگ‌های نفوذی الیگوسن هستند. سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه توسط توده نفوذی کوارتزومونوزودیوریتی به سن الیگوسن قطع شده است. کانی‌های اصلی این واحد سنگی را پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار و کوارتز و کانی‌های فرعی آن را بیوتیت، آمفیبول، کانی‌های تیره و بندرت کلینوپیروکسن تشکیل می‌دهند. در مناطق دگرسان شده، اغلب هورنبلندها به بیوتیت و بیوتیت‌ها به کلریت تبدیل شده‌اند. فعالیت سیالات گرمایی منتج از توده نفوذی سبب تشکیل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک و پروپلیتیک در سنگ میزبان شده است. در اثر عبور سیالات گرمایی در امتداد زون‌های خرد شده و گسلی، ضمن دگرسانی سنگ درونگیر کوارتزومونوزودیوریتی سبب تشکیل زون‌های استوک‌ورکی و رگه- رگچه‌های سیلیسی شده است. رگه و رگچه‌های سیلیسی طلادار حاوی پیریت و مقادیر کمی کالکوپیریت، اسفالریت و گالن هستند. طلای طبیعی به اندازه ۲ تا ۵ میکرون در بخش‌های دگرسان شده پیریت به هیدرو اکسید آهن (گوتیت) در مقاطع صیقلی مشاهده می‌شود. مطالعات

سنگ‌نگاری و حرارت‌سنجی میانبارهای سیال در داخل بلورهای درشت کوارتز صورت گرفت. بلورهای کوارتز در این رگه-رگچه‌ها هم‌رشدی و هم‌زادی با کانی‌های سولفیدی و طلا نشان می‌دهند. میانبارهای سیال دارای اشکال چندوجهی، کشیده، سوزنی، کروی و منفی بلور بوده و از نظر پاراژنتیکی، به صورت میانبارهای اولیه، ثانویه و ثانویه دروغین مشاهده می‌شوند. اندازه میانبارهای سیال از ۱۰ تا ۲۴ میکرون متغیر است. میانبارهای سیال مطالعه شده به ۴ نوع قابل تقسیم است: (۱) دوفازی مایع-بخار (L+V)، (۲) دوفازی بخار-مایع (V+L)، (۳) تک‌فازی بخار (V) و (۴) تک‌فازی مایع (L). فراوانی میانبارهای دوفازی غنی از مایع بیشتر از بقیه میانبارها است. مطالعات حرارت‌سنجی طی دو مرحله سرمایش و گرمایش بر روی میانبارهای دوفازی غنی از مایع صورت گرفت. دامنه تغییرات دماهای همگن شدن برای میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع بین ۱۷۰ تا ۲۸۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. بر اساس مقادیر این دماها، شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع در محدوده بین ۳/۲۷ تا ۸/۵۱ با میانگین ۵/۷۵ درصد وزنی معادل نمک طعام قرار می‌گیرد. بر اساس نمودار دو متغیره شوری در مقابل دمای همگن شدن، نقاط مربوط به یافته‌های حرارت‌سنجی میانبارهای سیال در نبی‌جان یک روند افزایش نسبت به شوری به میزان تقریباً سه برابر (از ۳/۲٪ تا ۸/۵٪) همراه با کاهش قابل ملاحظه نسبت به دما (از ۲۸۲ درجه سانتی‌گراد به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) را نشان می‌دهند که تا حدودی مشابه روند جوشش می‌باشد. همچنین حضور میانبارهای سیال تک‌فاز مایع می‌تواند حاکی از آن باشد که فعالیت سیالات هیدروترمالی تا دماهای زیر ۷۰ درجه سانتی‌گراد ادامه داشته است. دماهای ذوب یخ از ۲- تا ۵/۵- درجه سانتی‌گراد متغیر است که منطبق بر شوری‌های بین ۳/۲۷ تا ۸/۵۱ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشند. روند دمای همگن شدن - شوری با رخداد جوشش فلوئیدهای کانه‌ساز سازگار است. به نظر می‌رسد که نهشت سولفیدها و طلا در طی همین فرآیند جوشش صورت گرفته باشد. با توجه به میانگین دماهای همگن شدن و شوری‌های میانبارهای سیال و با استفاده از نمودار فشار میانبارهای سیال (در هنگام همگنی) در مقابل دمای همگن شدن حداقل فشار سیال در هنگام نهشت کانی‌های باطله و کانسنگی در حدود ۲۵ بار بوده است. با توجه به رخداد جوشش سیال، این فشار را باید از نوع هیدرواستاتیک در نظر گرفت که معادل عمقی حدود ۲۵۰ متر است. این عمق را می‌توان به عنوان کمترین عمق کانه‌زایی سولفیدی و طلا در منطقه نبی‌جان در نظر گرفت. بر اساس نمودار دما - شوری (Wilkinson, 2001) کانه‌زایی سولفیدی - طلا در منطقه نبی‌جان در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

کانی‌سازی در منطقه نبی‌جان به صورت استوک‌ورک و رگه - رگچه‌های کوارتزی در داخل سنگ درونگیر کوارتزومونزودپوریتی رخ داده است. عامل کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال به احتمال زیاد توده نفوذی مدفون می‌باشد که فقط رگه و رگچه‌های سیلیسی نشات گرفته از آن توانسته توده کوارتزومونزودپوریتی را قطع نماید. دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک و پروپلیتیک در اطراف رگه-رگچه‌های کوارتزی توسعه یافته‌اند. رگه-رگچه‌های کوارتز حاوی کانه‌زایی سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و طلای طبیعی بوده و بلورهای کوارتز در داخل این رگه - رگچه‌ها، بافت‌های شانه‌ای و پرکننده فضای خالی را نشان می‌دهند. دمای همگن شدن میانبارهای سیال دوفازی موجود در کوارتزهای همراه با کانه‌زایی در محدوده ۱۷۰ تا ۲۸۲ با بیشترین فراوانی بین ۱۷۰ تا ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. ویژگی‌های زمین‌شناسی، ساخت و بافت زون‌های کانه‌زایی و دگرسانی به همراه یافته‌های میکروترمومتریک در منطقه نبی‌جان با کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال دما پایین مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: کانه‌زایی سولفیدی- طلا، میانبارهای سیال، اپی‌ترمال، نبی‌جان، آذربایجان شرقی.

مقدمه

(2003) انجام گرفته است. بنی‌آدم (Bani Adam, 2005) مطالعاتی در زمینه زمین‌شناسی و خاستگاه احتمالی کانی‌سازی مس و طلا در محدوده اکتشافی نبی‌جان انجام داده است. وزیری هشی و همکاران (Vaziri-Hashi et al,

تاکنون پژوهش‌های زمین‌شناسی متعددی پیرامون منطقه نبی‌جان توسط محققین مختلف صورت گرفته است. اولین مطالعات اکتشافی در منطقه توسط شکویی (Shekouei,

ادامه یافته است. کانه‌زایی در این پهنه اغلب وابسته به سنگ‌های ماگمایی سنوزوئیک است. فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک در ایران منجر به تشکیل پلوتون‌های آلکالن تا کالک‌آلکالن همراه با سیستم‌های کانیاپی پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در جایگاه‌های پس از برخورد شده است (Nabatian et al, 2014; Sholeh et al, 2016; Yasami et al, 2017). مهم‌ترین توده‌های نفوذی موجود در این پهنه شامل استوک‌ها و باتولیت‌های شیورداغی، خانکندی، میزان، کلیبر، سونگون، اردوباد و هفت‌چشمه هستند (Sohrabi et al, 2015; Castro et al, 2001). سنوزوئیک در ائوسن با فعالیت آتشفشانی شدید در این پهنه آغاز شده و منجر به تشکیل سنگ‌های حدواسط تا اسیدی زیادی شده است. این فعالیت با جای‌گیری پلوتون‌های گرانیتوئیدی در اولیگومیوسن ادامه یافته و به دگرسانی و کانه‌زایی گسترده‌ای منجر شده است. توده‌های نفوذی اولیگومیوسن اغلب پلوتون‌های درشت دانه تا متوسط دانه گرانودیوریت و مونزونیت و به طور محلی پلوتون‌های جوان‌تر دیوریت و گابرو را در برمی‌گیرد. به طور محلی این سنگ‌های نفوذی، واحدهای کرتاسه (تناوب شیل و سیلت استون با میان لایه‌های آهکی و ولکانیک‌های ائوسن) را قطع کرده‌اند که نشان‌دهنده تأخیری بودن نسبت به آنها است. ولکانیسم دریایی کرتاسه پسین- پالئوسن شامل جریان‌های گدازه‌ای حدواسط تا اسیدی و سنگ‌های آذرآواری با ماهیت کالک‌آلکالن تا کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا هستند (Aghazadeh et al, 2011). ولکانیسم سنوزوئیک - کواترنری شامل دو دوره آتشفشانی است. ائوسن و میوسن پسین- کواترنری. توالی ائوسن شامل تراکی‌بازالت و تراکی‌آندزیت بازالتی با تفریت-بازانیت، فونولیت، آندزیت بازالتی و تراکی‌آندزیت فرعی است. واحدهای ماگمایی ائوسن ماهیت نسبتاً آلکالن و شوشونیتی دارند (Dilek et al, 2010) و توسط رسوبات فیلیش ائوسن پسین و یا توالی‌های رسوبی و آتشفشانی میوسن پسین پوشیده شده‌اند. دوره ماگمایی میوسن پسین- کواترنری توسط یک فاز اولیه گدازه‌های بازانیت، بازالت، آندزیت، تراکی‌آندزیت، تراکی‌داسیت، داسیت و ریولیتی میوسن پسین- پلیوسن پیشین و توسط یک فاز بعدی گدازه‌های تراکی‌بازالت، تراکی‌آندزیت بازالتی، آندزیت بازالتی، تراکی‌آندزیت، تراکیت و ریولیت مشخص

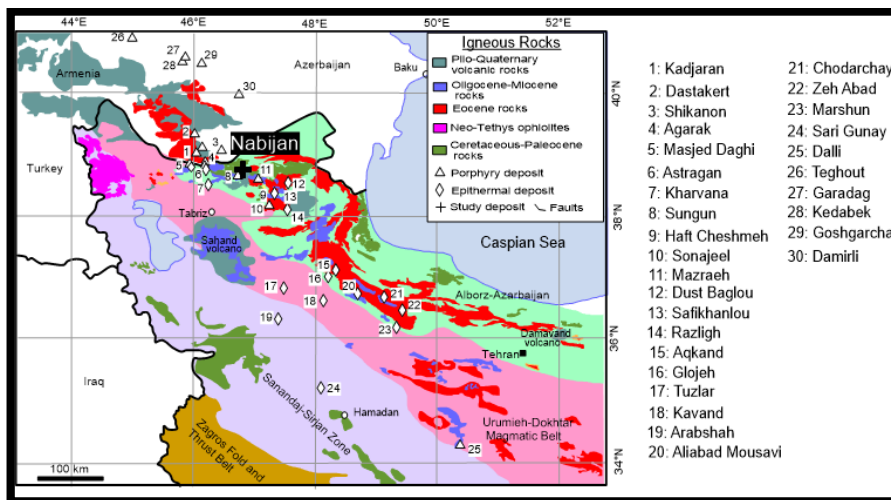
در خصوص ویژگی‌های کانه‌زایی و انواع دگرسانی‌ها در منطقه نبی جان تحقیقاتی انجام داده‌اند. جمالی و همکاران (Jamali et al, 2017) مطالعات ژئوشیمیایی در محدوده معدنی نبی جان انجام داده‌اند. بر اساس مطالعات اکتشافی صورت گرفته (حفر ترانشه، عملیات ژئوفیزیک به روش IR-IS، حفاری گمانه) توسط شکویی (Shekouei, 2003) از طرف سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور یک منطقه امیدبخش برای عناصر طلا و مس شناسایی و معرفی شد. بر اساس مطالعات مذکور حدود ۳۰۰ هزار تن کانسنگ طلا با عیار متوسط ۱/۳۷ گرم در تن تخمین زده شد. محققین قبلی بیشتر در خصوص زمین‌شناسی، ژئوشیمی، کانی‌سازی و دگرسانی در منطقه نبی جان مطالعاتی انجام داده‌اند. در این نوشتار سعی شده است ضمن توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و دگرسانی، مطالعات جدیدی برای اولین بار در خصوص میانبارهای سیال، شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز و تعیین ژنز کانسار بر اساس مطالعات مذکور در رگه - رگچه‌های کوارتزی - سولفیدی منطقه نبی‌جان انجام گیرد. تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی (دما - فشار) حاکم بر تشکیل رگه - رگچه‌های طلادار و تعیین نوع کانی‌سازی از ضروریات این پژوهش می‌باشد.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه نبی‌جان در فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب‌غرب کلیبر، استان آذربایجان شرقی، شمال‌غرب ایران و از نظر موقعیت زمین‌شناسی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و رزقان (Mehrperdo and Emami, 1992) با مختصات عرض جغرافیایی $38^{\circ} 45' 23''$ تا $38^{\circ} 47' 11''$ شمالی و طول جغرافیایی $46^{\circ} 47' 26''$ تا $46^{\circ} 49' 53''$ شرقی واقع شده است. طبق تقسیمات پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 2004)، این منطقه جزئی از بخش غربی کمربند ماگمایی البرز- آذربایجان محسوب می‌شود و از نظر فلززایی در پهنه فلززایی اهر- ارسباران قرار گرفته است (Castro et al, 2013). پهنه فلززایی اهر- ارسباران- قفقاز کوچک یکی از مهم‌ترین و غنی‌ترین پهنه‌های فلززایی طلا در شمال‌غرب ایران است (Jamali and Mehrabi, 2015; Jamali et al, 2010; Simmonds; and Moazzen, 2015). ماگماتیسم در این پهنه فلززایی طی کرتاسه پسین شروع شده و تا سنوزوئیک و کواترنری

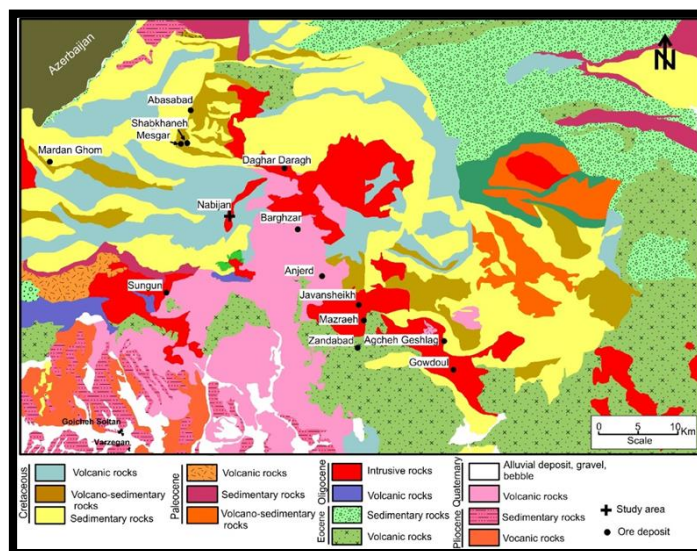
اپی‌ترمال شرف‌آباد (Ebrahimi et al, 2009)، مسجدداغی (Ebrahimi et al, 2017)، زاگلیک- ساریلار (Jamali and Mehrabi, 2015)، اندریان (میوه‌رود) و آسترکان (Ferdowsi et al, 2015)، میرکوه‌علی‌میرزا (Maghsoudi et al, 2014)، صفی‌خانلو- نقدوز (Ghamidzadeh, 2002)، آق‌درق (Asgharzadeh Asl et al, 2017) و یارالوجه (Jabarzadeh et al, 2015) اشاره کرد.

می‌شوند (Kheirkhah et al, 2009). کانسارهای گرمایی فلزات گرانبها در ایران عمدتاً در ارتباط با ماگماتیسم سنوزوئیک می‌باشند. پهنه فلززایی اهر- ارسباران میزبان انواع مختلف کانه‌زایی‌های پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال می‌باشد (شکل‌های ۱ و ۲) (Calagari, 2004; Hezarkhani et al, 1998) که از جمله این کانسارها می‌توان به کانسارهای پورفیری سونگون (Calagari, 2004)، هفت‌چشمه (Adeli et al, 2014) و قره‌چیلر (Asia Sofiani et al, 2018; Sohrabi et al, 2015) و کانسارهای



شکل ۱: پراکندگی کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال در شمال غرب ایران (Richards and Sholeh, 2016).

Fig. 1: Distribution of porphyry and epithermal deposits in northwestern Iran (Richards and Sholeh, 2016).



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده بخشی از پهنه فلززایی اهر - ارسباران شامل نقشه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ کلبر (مهرپرتو و ناظر، ۱۳۷۷)، ورزقان (مهرپرتو و امامی، ۱۳۷۱) و موقعیت توده‌های نفوذی بزرگ و توزیع کانسارها و رخدادهای معدنی فلزات پایه و گرانبها در آن. Fig. 2: Simplified geological map of part of the Ahar-Arasbaran metallogenic zone, including 1:100,000 maps of Caliber (Mehrperto and Nazer, 1998), Varzeghan (Mehrperto and Emami, 1992), and the location of large intrusive masses and the distribution of deposits and mineral occurrences of base and precious metals therein.

مواد و روش‌ها

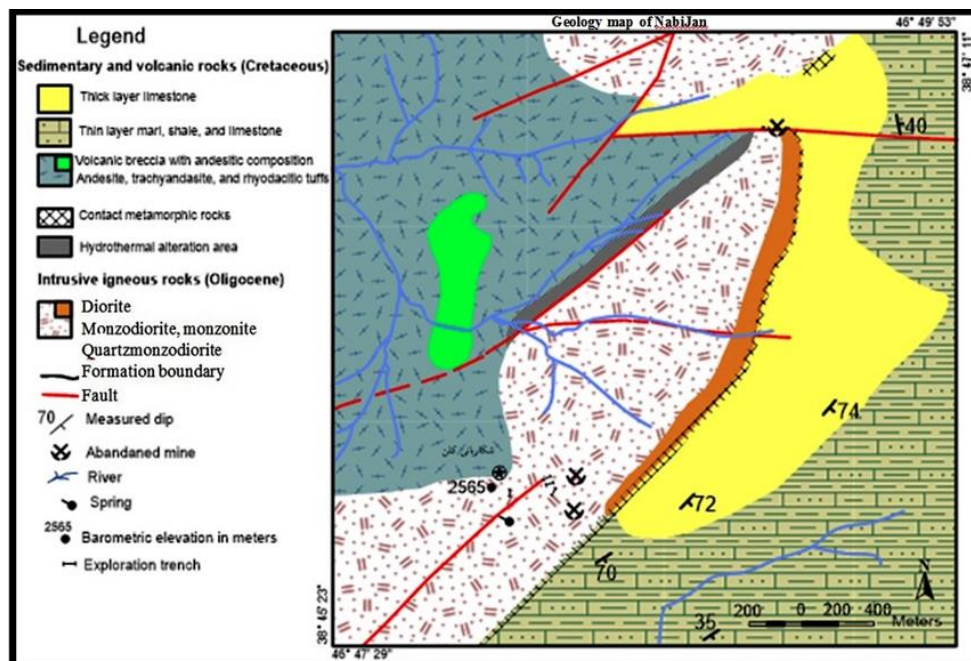
الکتریکی) درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت $\pm 0/6$ درجه سانتی‌گراد در دمای $+414$ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب نیترات سزیم) و $\pm 0/2$ درجه سانتی‌گراد در دمای $-94/3$ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب n- هگزان) انجام شد. میزان شوری میانبارهای سیال بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام (wt% NaCl eq) با استفاده از دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mice}) و با بهره‌گیری از رابطه (Hall et al, 1988) محاسبه گردید.

بحث و نتایج

سنگ‌نگاری

با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه نی‌جان (شکل ۳) و بر اساس بررسی‌های صحرایی انجام شده، واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه نی‌جان شامل سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه و سنگ‌های نفوذی الیگوسن هستند. کهن‌ترین سنگ‌های منطقه، گدازه‌های آندزیتی تا تراکی آندزیتی کرتاسه می‌باشند. بر روی این سری آتشفشانی، مجموعه رسوبی کرتاسه (شیل و آهک) قرار می‌گیرد. در منطقه نی‌جان سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه در اثر نفوذ یک توده نفوذی با ترکیب دیوریتی، مونزونیتی، مونزودیوریتی تا کوارتزمونزودیوریتی به سن الیگوسن قطع شده است (شکل ۳).

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. در مطالعات صحرایی، رگه‌های کانهدار شناسایی شد و چگونگی ارتباط آنها با سنگ‌های میزبان و پهنه‌های دگرسانی مورد بررسی قرار گرفت و نمونه‌برداری از آنها برای بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شد. در این راستا ۶۰ نمونه از واحدهای سنگی میزبان و رخنمون‌های کانهداری برداشت شد. در طی مطالعات آزمایشگاهی، ۲۰ مقطع نازک و ۵ مقطع صیقلی تهیه گردید و در دانشگاه تبریز مورد بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانهداری قرار گرفت. به منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانهدار و بررسی روند تغییرات شیمی و دمای سیالات کانهدار در طی نهشت کانسنگ‌ها، مطالعات سنگ‌نگاری و حرارت‌سنجی میانبارهای سیال بر روی ۵ نمونه حاوی بلورهای کوارتز همزاد با کانهداری سولفیدی و طلا (برداشت شده از رگه‌های کوارتزی) انجام شد. اندازه‌گیری‌های حرارت‌سنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال Linkam مدل THMSG600 متصل به میکروسکوپ OLYMPUS مدل BX-51 دارای LD-LensX40 و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در دانشگاه پیام نور تبریز انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه -190 (توسط نیتروژن مایع) تا $+600$ (توسط انرژی



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه نی‌جان با تغییرات از شکویی، ۱۳۸۲

Fig. 3: Geological map of the Nabijan region with changes from Shekoui, 2003

می‌باشد (شکل‌های ۴ A, B, C). توده کوارتزمونزودیوریتی بر اثر نفوذ محلول‌های گرمایی حاصل از توده احتمالی کانی ساز مدفون، به شدت دگرسان شده و حاوی رگچه‌های فراوان کوارتز است.

ترکیب غالب در توده نفوذی نبی جان در حاشیه دیوریتی و به سمت مرکز و محل کانی سازی کوارتزمونزودیوریتی است. توده نفوذی توده کوارتزمونزودیوریتی بخش اعظم منطقه را تشکیل داده و بعنوان سنگ درونگیر کانی‌سازی



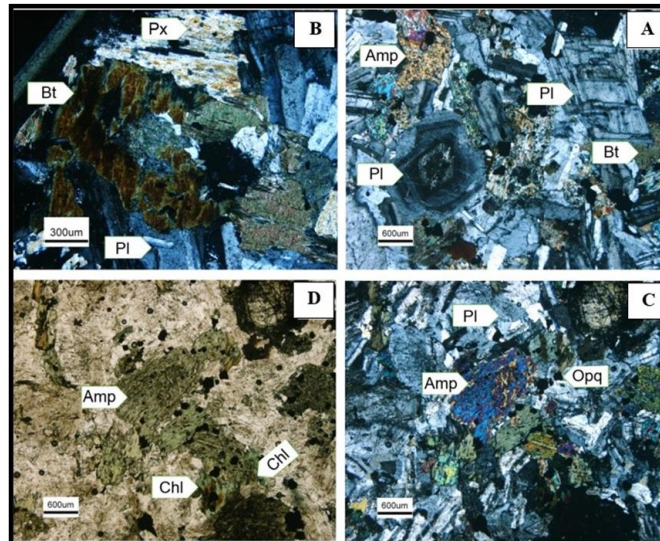
شکل ۴: A: دورنمایی از توده نفوذی کوارتزمونزودیوریتی؛ B: سنگ‌های خرد شده توده نفوذی میزبان کانه‌زایی در منطقه؛ C: ترانشه اکتشافی حفر شده در واحد میزبان کانه‌زایی.

Fig. 4: A: Perspective of the quartz-monzodiorite intrusion; B: crushed rocks of the mineralizing host intrusion in the region; C: Exploration trench dug in the mineralizing host unit.

دگرسانی و کانه‌زایی

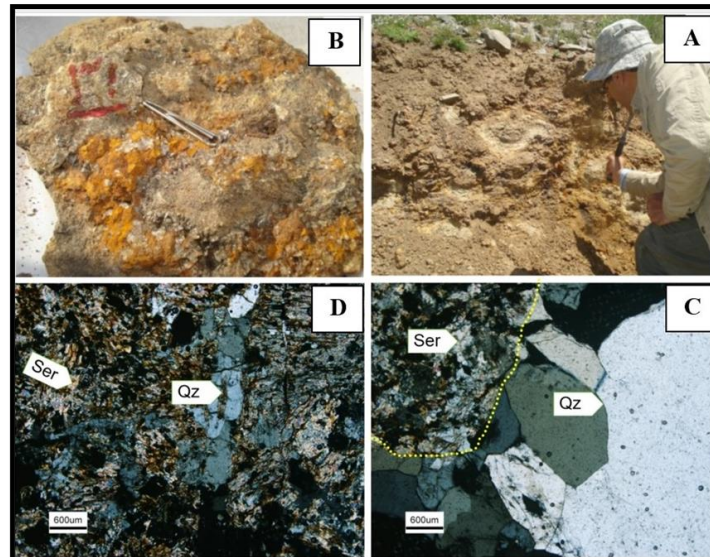
فعالیت سیالات گرمایی در منطقه مورد مطالعه، سبب تشکیل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک و پروپلیتیک در سنگ میزبان شده است. دگرسانی سیلیسی در اطراف رگه - رگچه‌های کوارتزی مشاهده شده و در ارتباط با کانه‌زایی سولفیدی - طلا در منطقه می‌باشد. این پهنه دگرسانی شامل رگه - رگچه‌های کوارتزی (به ضخامت ۱ تا ۷ متر) بوده و کوارتز فاز کانیایی اصلی را در این پهنه تشکیل می‌دهد. دگرسانی فیلیک به ضخامت ۱ تا ۱۰ متر در اطراف رگه و رگچه‌های سیلیسی تشکیل شده است (شکل‌های ۶ A و B). در دگرسانی فیلیک، پلاژیوکلاز و پتاسیم فلدسپار به سرسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. سرسیت همراه با کوارتز ثانویه و پیریت کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این دگرسانی بوده (شکل‌های ۶ C و D) و در برخی موارد، قالب پلاژیوکلاز اولیه توسط سرسیت ثانویه پر شده است. گاهی مقدار کانی‌های رسی افزایش یافته و همپوشانی دگرسانی فیلیکی با آرژیلیکی را نشان می‌دهد. دگرسانی پروپلیتیک در فاصله ۱ تا ۱۰ متری از رگه - رگچه‌های کوارتزی تشکیل شده و کلریت و اپیدوت کانی‌های اصلی این زون دگرسانی هستند. در زون دگرسانی پروپلیتیک، کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند، کلینوپیروکسن و بیوتیت) بیشتر به کلریت و به مقدار جزئی به اپیدوت دگرسان شده‌اند.

طبق مشاهدات میکروسکوپی، این سنگ‌ها اغلب دارای بافت پورفیری و گرانوفیری هستند (شکل ۵ A). کانی‌های اصلی این واحد سنگی را پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار و کوارتز و کانی‌های فرعی آن را بیوتیت، آمفیبول، کانی‌های تیره و بندرت کلینوپیروکسن تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازها در بیشتر موارد دارای ماکل پلی‌سنتیک بوده و در اکثر موارد تحت تأثیر محلول‌های گرمایی به سرسیت و اپیدوت تجزیه شده‌اند. پتاسیم فلدسپارها به طور عمده ماکل کارلسباد نشان می‌دهند و اغلب به کانی‌های رسی و کربنات دگرسان شده‌اند. بلورهای کوارتز نیز به صورت نیمه شکل دار مشاهده می‌شوند. توده‌های نفوذی در محدوده کانه‌زایی دارای ترکیب دیوریتی تا کوارتزمونزودیوریتی با کانی‌شناسی کوارتز (۲۰-۱۰٪)، پلاژیوکلاز (۴۵-۳۵٪)، پتاسیم فلدسپار (۳۵-۳۰٪)، بیوتیت (۱۵-۵٪)، هورنبلند (۱۰-۵٪) و کانی‌های تیره (۵-۱٪) و پیروکسن (۳-۱٪) هستند. حضور دو کانی‌های آبدار آمفیبول (هورنبلند) و بیوتیت و مقادیر کم کلینوپیروکسن نشانگر آبدار بودن ماگمای مولد می‌باشد. در مناطق دگرسان شده، اغلب هورنبلندها به بیوتیت و بیوتیت‌ها به کلریت تبدیل شده‌اند. کانی‌های اپیدوت، کلسیت، انکریت، سرسیت و کائولینیت بصورت ثانویه از دگرسانی و هوازدگی کانی‌های اولیه، بخصوص پلاژیوکلازها و آلکالی فلدسپار حاصل شده‌اند (شکل‌های ۵ B, C, D).



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپی از توده نفوذی کوارتز مونزودیوریتی در منطقه نبی جان. A: بافت گرانولار توده نفوذی و حضور پلاژیوکلاز دارای بافت منطقه بندی، آمفیبول و بیوتیت (XPL); B: بیوتیت به همراه پیروکسن (XPL); C: حضور درشت بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلاز به همراه کلریت و کانی های اپک (XPL); D: تصویر ۵ پ در نور PPL. Amp: آمفیبول؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Chl: کلریت؛ Bt: بیوتیت؛ Px: ارتوپیروکسن؛ Opq: اپک.

Fig. 5: Microscopic images of the quartz-monzodiorite intrusion in the Nabijan area. A: Granular texture of the intrusion and the presence of plagioclase with zoning texture, amphibole and biotite (XPL); B: Biotite with pyroxene (XPL); C: Presence of large crystals of amphibole and plagioclase with chlorite and opac minerals (XPL); D: Image 5p in PPL light. Amp: amphibole; Pl: plagioclase; Chl: chlorite; Bt: biotite; Px: orthopyroxene; Opq: opac.



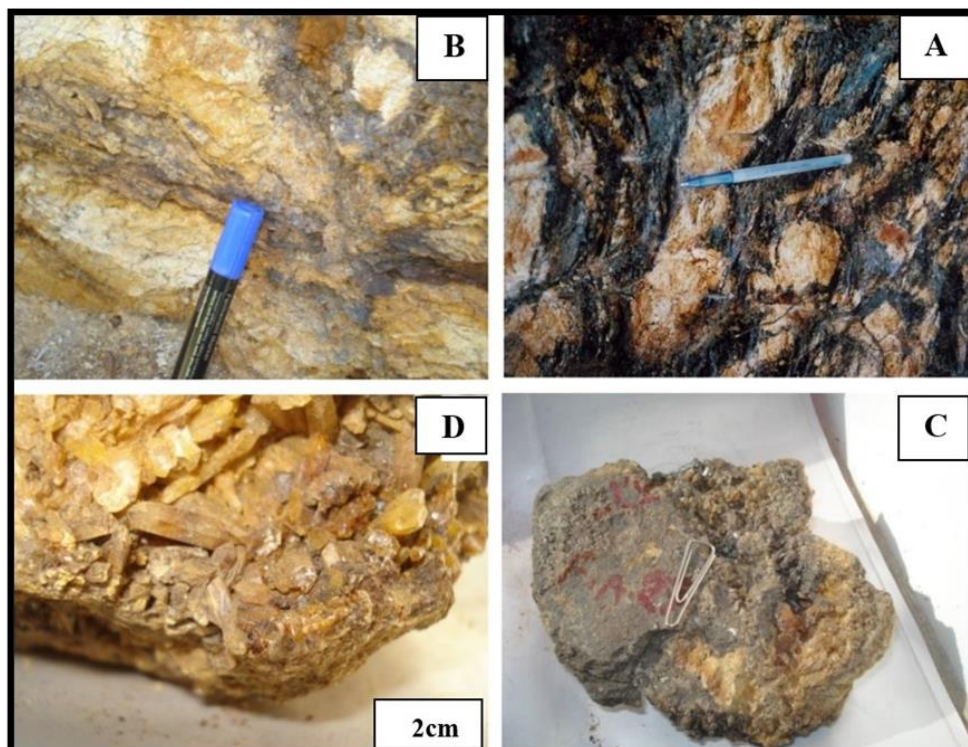
شکل ۶: A و B: نمای دور و نزدیک از دگرسانی فیلیک به ابعاد حدود ۱ متر در منطقه نبی جان؛ C: حضور رگچه کوارتزی در زون دگرسانی فیلیک در منطقه نبی جان (XPL)؛ D: حضور سریسیت، کوارتز و کانی های اپک (XPL) در زون دگرسانی فیلیک. Ser: سریسیت؛ Qz: کوارتز. Fig. 6: A and B - Far and close-up view of phyllic alteration with dimensions of about 1 meter in the Nabijan area; C - Presence of quartz vein in the phyllic alteration zone in the Nabijan area (XPL); D - Presence of sericite, quartz and opaque minerals (XPL) in the phyllic alteration zone. Ser: sericite; Qz: quartz.

سنگ درونگیر کوارتز مونزودیوریتی رخ داده است (شکل های A و B). توده اصلی عامل کانه زایی اپی ترمال در سطح زمین رخنمون نداشته و به احتمال زیاد در بخش

کانه زایی سولفیدی- طلا در نبی جان در اثر عبور سیالات گرمابی در امتداد زون های شکسته و گسلی به صورت استوکورکی و رگه - رگچه های کوارتزی منقطع در داخل

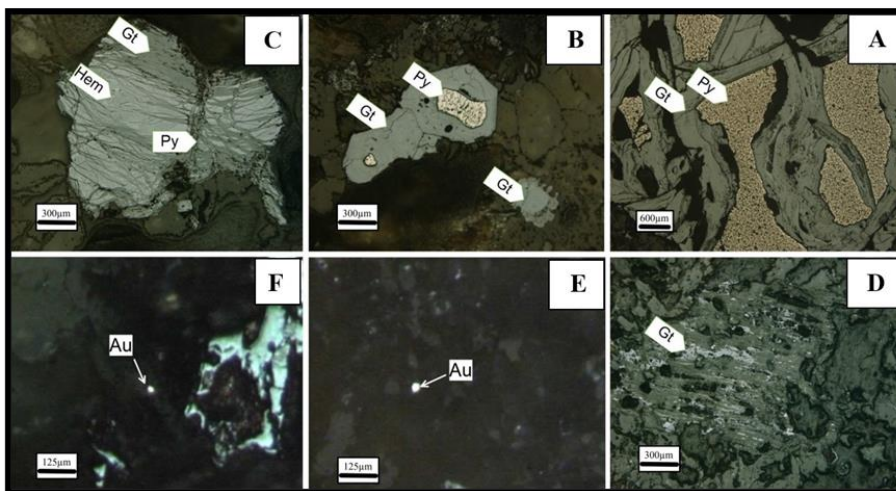
کانی اصلی سولفیدی رگه‌ها پیریت بوده (شکل‌های A و B) که به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل قابل مشاهده است. پیریت به طور بخشی توسط هیدرواکسید آهن (گوتیت) و گاهی اکسید آهن (هماتیت) جانشین شده است (شکل‌های A و C و D)، به طوری که سودومورف این کانی‌ها بعد از پیریت در برخی موارد به صورت مکعبی دیده می‌شود (شکل‌های A و B) که حاصل اکسیداسیون پیریت در زون هوازده می‌باشد. طلای طبیعی در نبی‌جان به اندازه ۲ تا ۵ میکرون در بخش‌هایی که بلورهای پیریت به هیدرواکسید آهن (گوتیت) دگرسان شده‌اند، مشاهده می‌شوند (شکل‌های E و F). میزان ذخیره طلای نبی‌جان بر پایه حفاری گمانه‌ها، ۳۲۰۰۰۰ تن با عیار میانگین ۱/۳۷ گرم در تن است (Jamali et al, 2017).

زیرین توده کوارتز مونوزودوپوریتی جایگیری نموده است. رخنمون اصلی رگه - رگچه‌های کوارتزی مس و طلا دار در داخل توده نفوذی گسترش یافته است. رگه - رگچه‌های سولفیدی - طلا به صورت زون‌های کانه‌دار به ضخامت ۱ تا ۷ متر و طول ۱۰ تا ۵۰ تشکیل شده‌اند. در داخل زون کانه‌دار گاهی رگه‌های کوارتزی منقطع به طول تقریبی ۱۰ متر و ضخامت ۰/۱ تا ۰/۵ متر تشکیل شده است. بلورهای کوارتز در داخل رگه - رگچه‌ها، بافت‌های دروزی، شانهای و پرکننده فضای خالی (شکل‌های C و D) را نشان می‌دهند. همچنین برخی از کوارتزها به صورت بای پیرامیدال هستند. بافت‌های مذکور از ویژگی‌های ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین محسوب می‌شوند (Dong et al, 1995; Robert et al, 2007). رگه و رگچه‌های حاوی پیریت و مقادیر کمی کالکوپیریت، اسفالریت و گالن هستند.



شکل ۷: A: نمایی از رگه- رگچه‌های کوارتزی منطقه نبی‌جان؛ B: نمایی از کانه‌زایی استوک‌ورک؛ C و D: نمونه‌های دستی از بلورهای کوارتز با بافت پرکننده فضاهای خالی و شانهای.

Fig. 7: A: View of quartz veins in the Nabijan area; B: View of stockwork mineralization; C and D: Hand samples of quartz crystals with void-filling and comb-like textures.

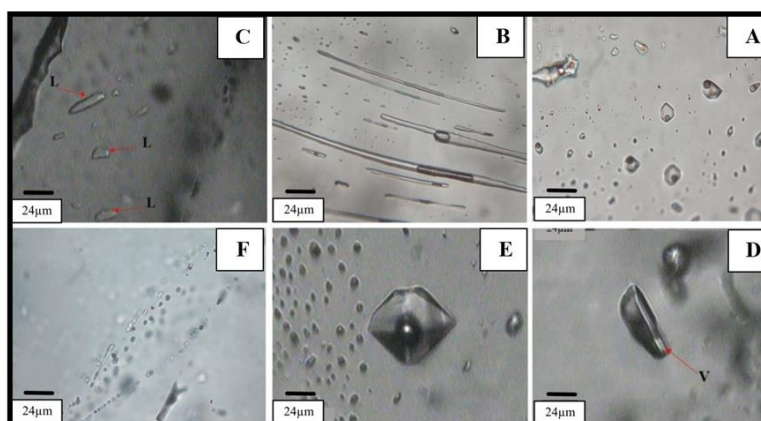


شکل ۸: A و B: جانشینی پیریت توسط گوتیت و تشکیل بافت بازماندی؛ C: تبدیل هماتیت به گوتیت؛ D: گوتیت حاصل از آهن آزاد شده از شبکه کانی‌های فرومنیزین؛ E و F: تصاویر میکروسکوپی طلای طبیعی در زون کانی‌زایی نی‌جان. Py: پیریت؛ Gt: گوتیت؛ Hem: هماتیت.
 Fig. 8: A and B: Replacement of pyrite by goethite and formation of residual texture; C: Transformation of hematite to goethite; D: Goethite resulting from iron released from the ferromagnesian mineral network; E and F: Microscopic images of natural gold in the Nabijan mineralization zone. Py: pyrite; Gt: goethite; Hem: hematite.

مطالعه میانبارهای سیال

مطالعات سنگ‌نگاری و حرارت‌سنجی میانبارهای سیال در داخل بلورهای درشت کوارتز برداشت شده از داخل رگه - رگچه‌های کوارتزی صورت گرفت. بلورهای کوارتز در این رگه - رگچه‌ها هم‌رشدی و هم‌زادی با کانی‌های سولفیدی و طلا نشان می‌دهند. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری مقاطع دوبر صیقلی، میانبارهای سیال دارای اشکال چندوجهی، کشیده، سوزنی، کروی و منفی بلور بوده (شکل ۹) و از نظر پاراژنتیکی، به صورت میانبارهای اولیه (شکل‌های ۹ A تا

G)، ثانویه (شکل ۹ H) و ثانویه دروغین مشاهده می‌شوند. اندازه میانبارهای سیال در نی‌جان از ۱۰ میکرون تا ۲۴ میکرون متغیر بوده و پدیده باریک‌شدگی (Necking down) نیز بعضاً در آن‌ها دیده می‌شود. بر اساس محتوای فازی و با توجه به تقسیم‌بندی‌های (Roedder, 1984) و (Shepherd, 1985)، میانبارهای سیال مطالعه شده را می‌توان به ۴ نوع تقسیم کرد: ۱) دوفازی مایع-بخار (L+V)، ۲) دوفازی بخار - مایع (V+L)، ۳) تک‌فازی بخار (V) و ۴) تک‌فازی مایع (L) (شکل ۹).



شکل ۹: الف: میانبارهای دوفازی مایع - بخار (L+V) به شکل چندوجهی؛ ب: میانبارهای دوفازی مایع - بخار (L+V) به شکل کشیده؛ پ: میانبارهای تک‌فازی مایع (L)؛ ت: میانبارهای تک‌فازی بخار (V)؛ ث: تصویری از شکل منفی بلور در نمونه‌های مورد بررسی؛ ج: میانبارهای سیال ثانویه.

Fig. 9: A: Two-phase liquid-vapor (L+V) interlayers in a polyhedral shape; B: Two-phase liquid-vapor (L+V) interlayers in an elongated shape; C: Single-phase liquid (L) interlayers; D: Single-phase vapor (V) interlayers; E- Image of the negative shape of the crystal in the samples under study; F: Secondary fluid interlayers.

حرارت‌سنجی نی‌جان بر روی نمودار دومتغیره دمای همگن شدن در مقابل شوری (Wilkinson, 2001) نشان می‌دهد که چگالی بیشتر میانبارهای سیال در محدوده بین 0.38 g/cm^3 تا 0.95 g/cm^3 قرار می‌گیرند (شکل‌های ۱۰ D و ۱۱ A). به منظور تعیین نوع کمپلکس‌های مؤثر در حمل فلزات کانسنگی از نمودار دمای همگن شدن و شوری (Pirajno, 2009) استفاده شد که بر این اساس، کمپلکس‌های سولفیدی سهم عمده‌ای در حمل و نقل عناصر کانسنگی به‌ویژه طلا در نی‌جان داشته‌اند (شکل ۱۱ B). بر اساس نمودار دو متغیره شوری در مقابل دمای همگن شدن، نقاط مربوط به یافته‌های حرارت‌سنجی میانبارهای سیال در نی‌جان یک روند افزایش نسبت به شوری به میزان تقریباً سه برابر (از $3/2\%$ تا $8/5\%$) همراه با کاهش قابل ملاحظه نسبت به دما (از 282 درجه سانتی‌گراد به 170 درجه سانتی‌گراد) را نشان می‌دهند که تا حدودی مشابه روند جوشش می‌باشد (شکل ۱۱ C). همچنین حضور میانبارهای سیال تک فاز مایع می‌تواند حاکی از آن باشد که فعالیت سیالات هیدروترمالی تا دماهای زیر 70 درجه سانتی‌گراد ادامه داشته است. با توجه به میانگین دماهای همگن شدن و شوری‌های میانبارهای سیال و با استفاده از نمودار فشار میانبارهای سیال (در هنگام همگنی) در مقابل دمای همگن شدن (شکل ۱۱ D)، حداقل فشار سیال در هنگام نهشت کانی‌های باطله و کانسنگی در حدود 25 بار بوده است.

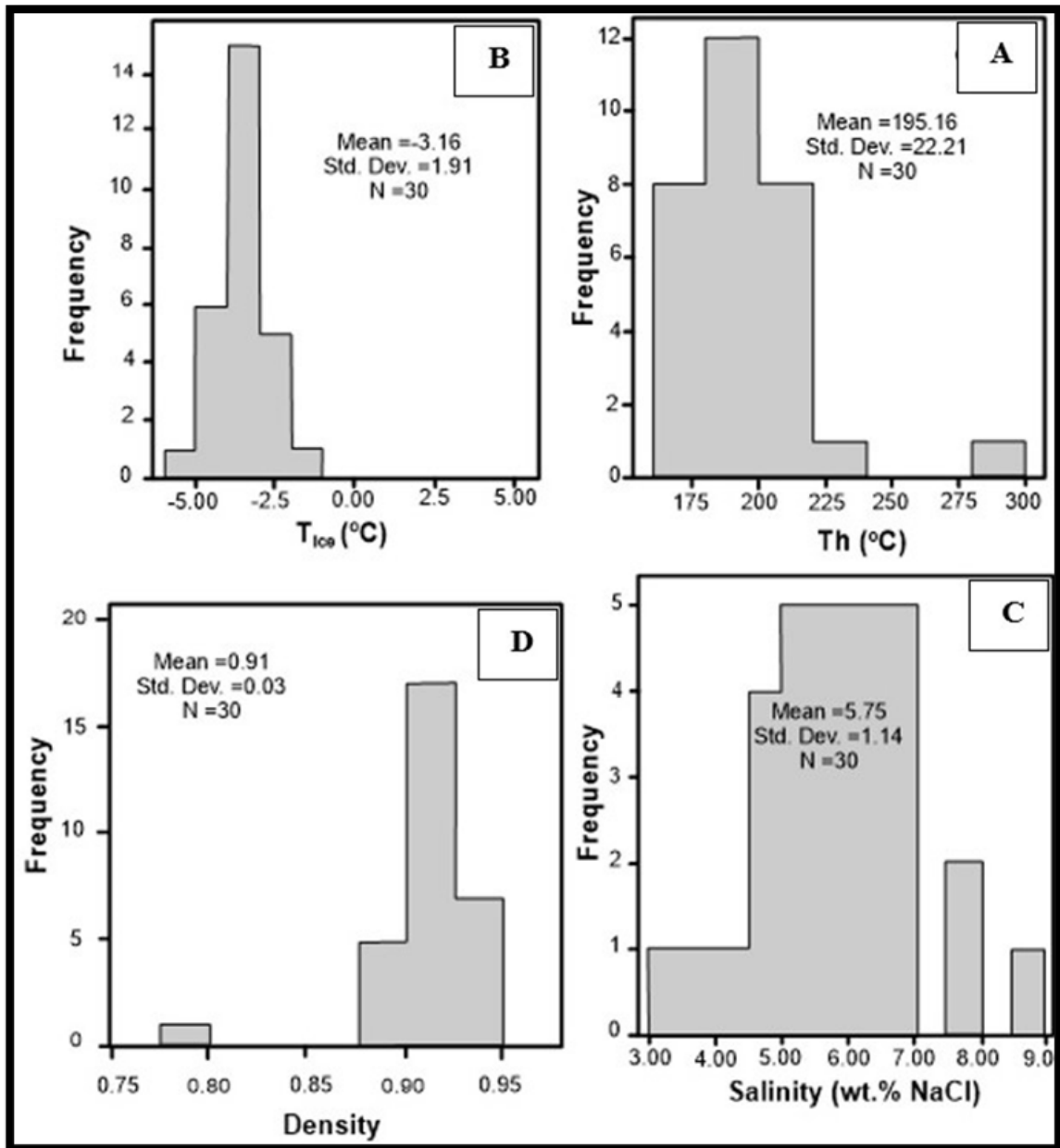
با توجه به رخداد جوشش سیال، این فشار را باید از نوع هیدرواستاتیک در نظر گرفت که معادل عمقی حدود 250 متر است که می‌توان آن را به عنوان کمترین عمق کانه‌زایی سولفیدی و طلا در نی‌جان در نظر گرفت. همچنین به‌منظور تعیین منشأ کانه‌زایی سولفیدی-طلا در نی‌جان از نمودار دو متغیره دمای همگن شدن در برابر شوری (Wilkinson, 2001) استفاده شد که در روی آن یافته‌های میانبارهای سیال نی‌جان، در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرند (شکل ۱۲).

میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع حاوی 70 تا 80 درصد فاز مایع و 20 تا 30 درصد فاز بخار هستند. میانبارهای سیال دوفازی غنی از بخار نیز حاوی 95 درصد فاز بخار و 5 درصد فاز مایع می‌باشند. در برخی موارد میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع همراه با میانبارهای سیال دوفازی غنی از بخار و تک‌فازی بخار حضور دارند که همزیستی این میانبارهای سیال می‌تواند بیانگر رخداد جوشش در زمان کانی‌سازی باشد (White and Simmons et al, 2005; Hedenquist, 1995). مطالعات حرارت‌سنجی طی دو مرحله سرمایش و گرمایش بر روی میانبارهای دوفازی غنی از مایع صورت گرفت. طی عملیات سرمایش، انجماد نهایی میانبارهای سیال در محدوده دمایی 80 - تا 90 - درجه سانتی‌گراد انجام شد. سپس با افزایش دما اولین نقطه ذوب یخ (T_e) اندازه‌گیری شد. از آنجائیکه نقاط ذوب یوتکتیک (first melting points) در حوالی 21 - درجه سانتی‌گراد هستند، از اینرو می‌توان گفت که مواد جامد محلول در داخل میانبارهای سیال نی‌جان به‌طور عمده از نوع NaCl بوده (Borisenko, 1977) و میزان نمک‌های محلول دیگر بسیار اندک است. در مرحله بعد دمای نقاط ذوب مربوط به آخرین قطعه یخ ثبت شد که از مقادیر این دماها می‌توان جهت تخمین شوری سیال بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام استفاده کرد (Bodnar and Vityk, 1994). در مرحله گرمایش، دماهای همگن شدن میانبارهای سیال محاسبه شد و تمامی این میانبارها به فاز مایع همگن شدند. دامنه تغییرات دماهای همگن شدن برای میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع بین 170 تا 282 درجه سانتی‌گراد بوده و بیشترین فراوانی متعلق به دماهای بین 170 تا 210 درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱ و شکل ۱۰ A). دماهای ذوب آخرین قطعات یخ در محدوده بین 2 - تا $5/5$ - متغیر هستند (جدول ۱ و شکل ۱۰ B) که بر اساس مقادیر این دماها، شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع در محدوده بین $3/27$ تا $8/51$ با میانگین $5/75$ درصد وزنی معادل نمک طعام قرار می‌گیرد (جدول ۱ و شکل ۱۰ C). ترسیم یافته‌های

جدول ۱: نتایج حاصل از میکروترمومتری میانبارهای سیال در داخل بلورهای کوارتز موجود در رگه - رگچه‌های کوارتزی منطقه نبی‌جان.

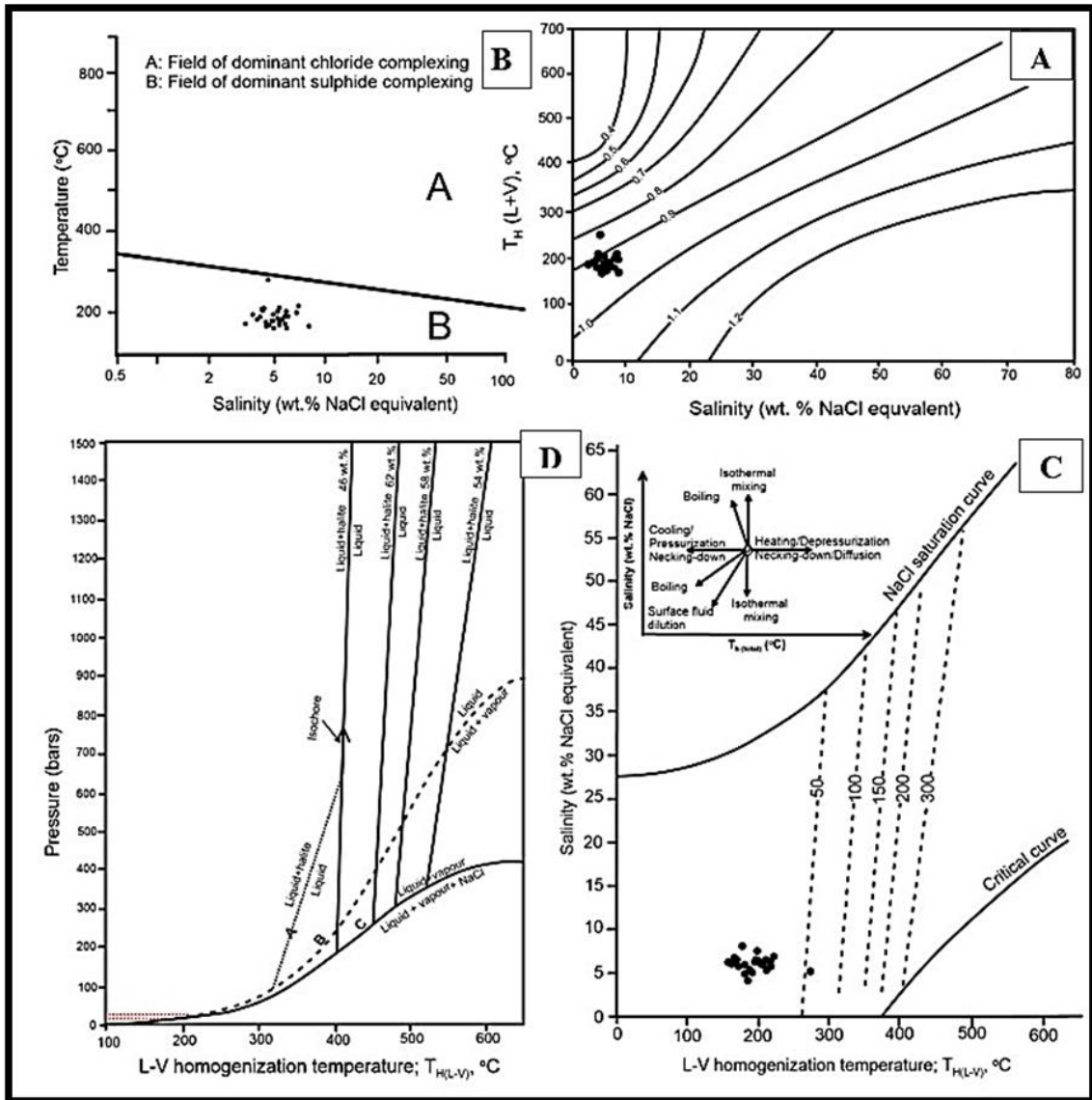
Table 1: Results from microthermometry of fluid inclusions inside quartz crystals in quartz veins-veins of the Nabijan region.

Number	Sample name	T _H (L-V) (°C)	T _{mice} (°C)	Salinity wt% NaCl	ρ (g/cm ³)
1		179	-4.1	6.52	0.94
2		175	-3.8	6.07	0.94
3	F.A.1	170	-3.5	5.62	0.94
4		189	-2.6	4.23	0.91
5		174	-3.1	5.01	0.93
6		181	-3.1	5.01	0.92
7		188	-3.9	6.22	0.92
8	F.A.2	185	-3.5	5.62	0.92
9		179	-2	3.27	0.91
10		205	-4.8	7.53	0.92
11		199	-2.4	3.91	0.9
12		197	-4.3	6.81	0.92
13		198	-4.1	6.52	0.92
14	F.A.3	172	-5.5	8.51	0.95
15		213	-2.9	4.7	0.89
16		209	-4.2	6.67	0.91
17		202	-3.5	5.6	0.91
18		191	-4	6.37	0.92
19		176	-3.3	5.32	0.93
20		190	-3.7	5.92	0.92
21		215	-3	4.85	0.89
22		282	-3.2	5.16	0.79
23		209	-2.9	4.7	0.89
24	F.A.4	184	-3.8	6.07	0.92
25		215	-3.8	6.07	0.89
26		195	-2.8	4.54	0.91
27		186	-3.4	5.47	0.92
28		209	-3.7	5.92	0.9
29		220	-4.9	7.67	0.9
30		168	-4.2	6.67	0.95



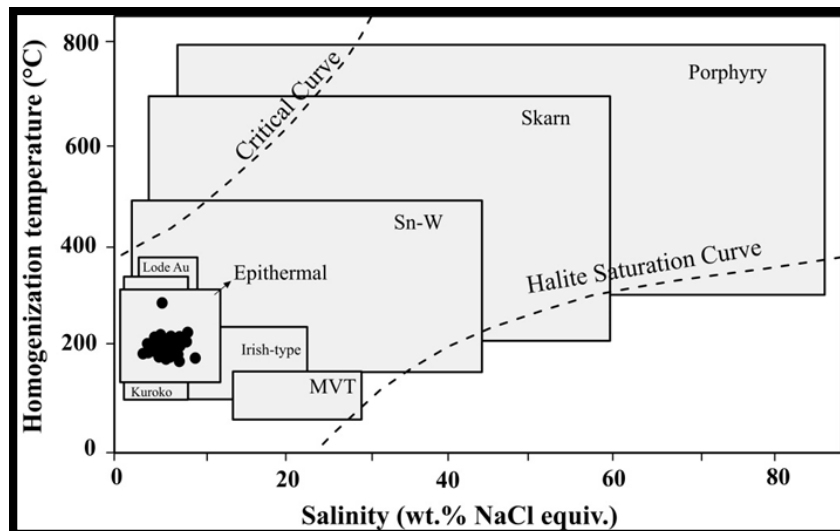
شکل ۱۰: A: هیستوگرام دمای همگن شدن میانبارهای سیال دو فازه (L+V); B: هیستوگرام دمای ذوب یخ میانبارهای سیال; C: هیستوگرام جمع‌شوری میانبارهای سیال; D: هیستوگرام چگالی.

Fig. 10: A: Histogram of homogenization temperature of two-phase fluid interlayers (L+V); B: Histogram of ice melting temperature of fluid interlayers; C: Cumulative histogram of salinity of fluid interlayers; D: Density histogram.



شکل ۱۱: A: نمودار تغییرات دما در برابر شوری (Wilkinson, 2001)، که در آن میانبرهای سیال رگه-رگچه‌های کوارتزی نابی‌جان چگالی‌هایی در محدوده ۰/۸۰ تا ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب را نشان می‌دهند. B: نمودار درصد شوری در مقابل دمای همگن شدن میانبرهای سیال ارائه شده توسط (Pirajno, 2009) جهت تعیین نوع کمپلکس حمل‌کننده عناصر. C: نمودار دو متغیره دمای همگن شدن در برابر شوری (Shepherd et al, 1985) که روند تکاملی سیالات در نابی‌جان در روی دیده می‌شود. D: نمودار فشار در برابر دمای همگن شدن. میانبرهای سیال با دماهای همگنی $T_s(\text{NaCl}) > T_H(\text{L-V})$ ، $T_s(\text{NaCl}) = T_H(\text{L-V})$ و $T_s(\text{NaCl}) < T_H(\text{L-V})$ به ترتیب مربوط به خطوط A (Hass, 1976; Roedder and Bodnar, 1980)، B (Hass, 1976; Urusova, 1975) و C (Keevil, 1942; Sourirajan and Kennedy, 1962) می‌باشند.

Fig. 11: A: Temperature versus salinity plot (Wilkinson, 2001), where the fluid interlayers of the Nabijan quartz vein-veinlets show densities in the range of 0.80 to 0.95 g/cm³. B: Salinity percentage plot versus homogenization temperature of the fluid interlayers presented by (Pirajno, 2009) to determine the type of element-carrying complex. C: Bivariate homogenization temperature plot (Shepherd et al, 1985), showing the evolution of fluids involved in the Nabijan in the crust. D: Pressure versus homogenization temperature plot. Fluid intermediates with homogeneity temperatures $T_s(\text{NaCl}) > T_H(\text{L-V})$, $T_s(\text{NaCl}) = T_H(\text{L-V})$ and $T_s(\text{NaCl}) < T_H(\text{L-V})$ correspond to lines A (Hass, 1976; Roedder and Bodnar, 1980), B (Hass, 1976; Urusova, 1975) and C (Keevil, 1942; Sourirajan and Kennedy, 1962), respectively.



شکل ۱۲: نمودار دو متغیره دمای همگن شدن در برابر شوری (Wilkinson, 2001) که در روی آن یافته‌های میانبارهای سیال نبی‌جان، در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرند.

Fig. 12: Bivariate diagram of homogenization temperature versus salinity (Wilkinson, 2001) on which the findings of the Nabijan fluid intermediates are in the epithermal range.

بخ از ۲- تا ۵/۵- درجه سانتی‌گراد متغیر است که منطبق بر شوری‌های بین ۳/۲۷ تا ۸/۵۱ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشند. روند دمای همگن شدن - شوری با رخداد جوشش فلوئیدهای کانه‌ساز سازگار است. به نظر می‌رسد که نهشت سولفیدها و طلا در طی همین فرآیند جوشش صورت گرفته باشد. ویژگی‌های زمین‌شناسی، ساخت و بافت زون‌های کانه‌زایی و دگرسانی به همراه یافته‌های میکروترمومتریکی حاکی از آن می‌باشند که نهشت کانی‌های کانسنگی و باطله در رگه - رگچه‌های کوارتزی منطقه نبی‌جان توسط محلول‌های اپی‌ترمالی دما پائین در اعماق نسبتاً کم رخ داده است.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

نتیجه‌گیری

کانی‌سازی در منطقه نبی‌جان به صورت استوک‌ورک و رگه - رگچه‌های کوارتزی در داخل سنگ درونگیر کوارتزمونوزودیوریتی رخ داده است. عامل کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال به احتمال زیاد توده نفوذی مدفون می‌باشد که فقط رگه و رگچه‌های سیلیسی نشات گرفته از آن توانسته توده کوارتزمونوزودیوریتی را قطع نماید. دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک و پروپلیتیک در اطراف رگه - رگچه‌های کوارتزی توسعه یافته‌اند. رگه - رگچه‌های کوارتزی حاوی کانه‌زایی سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و طلای طبیعی بوده و بلورهای کوارتزی در داخل این رگه - رگچه‌ها، بافت‌های شانه‌ای و پرکننده فضای خالی را نشان می‌دهند. دمای همگن شدن میانبارهای سیال دو فازی موجود در کوارتزی‌های همراه با کانه‌زایی در محدوده دمای ۱۷۰ تا ۲۸۲ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. دماهای ذوب

References

- Adeli, Z., Rasa, I. and Darvishzadeh, A., 2014. Fluid inclusion study of the ore-quartz veins at Haftcheshmeh porphyry copper (Mo) deposit, Ahar-Arasbaran Magmatic Belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, v. 65(2), p. 502-511.
- Aghanabati, S.A., 2004. *Geology of Iran*, 586 p (In Persian).
- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z. and Vogt, K., 2011. Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: The Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine Cambridge University Press*, p. 1-29.
- Asgharzadeh Asl, H., Mehrabi, B. and Tale Fazel, A., 2017. Mineralogy study, mineralization occurrence and temperature-pressure conditions of Aq Daraq polymetallic deposit, Ahar-Arasbaran metallogenic region. *Journal of Economic Geology*, v. 9(1), p. 1-23 (In Persian).
- Asia Sofiani, F., Mokhtari, M.A.A., Kohestani, H. and Azimzadeh, A.M., 2018. *Geology, geochemistry and fluid intercalation studies in*

- the copper-molybdenum-gold quartz veins of Qarachilar, northeast of Kharvana, East Azerbaijan. *Journal of Economic Geology*, v. 10(1), p. 139-171 (In Persian)
- Atalou, S., Nazafati, N., Lotfi, M. and Mehraj Aghazadeh, M., 2017. Fluid Inclusion Investigations of the Masjed Daghi Copper-Gold Porphyry-Epithermal Mineralization, East Azerbaijan Province, NW Iran. *Open Journal of Geology* v. 7(08), p. 1110-1127.
- Bani Adam, F., 2005. Geological study and possible origin of copper and gold mineralization in the Nabi Jan exploration area, Kalibar. Master's thesis, Earth Sciences Research Institute, Geological Survey of Iran, 148 p (In Persian).
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Short Course of the Working Group, Siena*, p. 117-130.
- Borisenko, A.S., 1977. Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method, *Soviet Geol. Geophys.*, v. 18, p. 11-19.
- Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 23(2), p. 179-189.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z. and Chichorro, M., 2013. Late Eocene-Oligocene post-collisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran, An example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source, *Lithos*, v. 180-181, p. 109-127.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: Collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, v. 52, p. 536-578.
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland-Classification, origin, and implication. *Economic Geology*, v. 90(6), p. 1841-1856.
- Ebrahimi, S., Alirezaei, S. and Pan, Y., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 350(1), p. 133-147.
- Ebrahimi, S., Ming Pen, Y., Alirezaei, S. and Mehrparto, M., 2009. Mineralogical studies and fluid intercalations of the Sharafabad epithermal gold deposit, northwestern Iran. *Quarterly Journal of Earth Sciences*, v. 18(71), p. 149-154 (In Persian).
- Ferdowsi, R., Kalagari, A.A., Hosseinzadeh, M.R. and Siahcheshm, K., 2015. Petrography, geochemistry and chemistry of minerals of the Estrekan porphyry stock, Kharvana, East Azerbaijan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, v. 23(4), p. 774-759 (In Persian).
- Ghamidzadeh, H., 2002. Economic geology and gold exploration in the Safikhanlu-Naghduz exploration area (southeast of Ahar). Master's thesis, Earth Sciences Research Institute, Geological Survey of Iran. 232 p (In Persian).
- Haas, J.L., 1976. Physical properties of the co-existing phases and thermochemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solutions: Preliminary steam tables for NaCl solutions. *United States Geological Survey Bulletin*, 1421 p.
- Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Economic Geology*, v. 83(1), p. 197-202.
- Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, v. 93(5), p. 651-670.
- Jabarzadeh, Z., Hosseinzadeh, M.R., Moayed, M. and Faramarzi, R., 2015. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration in the Yaraloja event (northwest Ahar-East Azerbaijan). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, v. 23(1), p. 75-86 (In Persian).
- Jamali, H. and Mehrabi, B., 2015. Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran magmatic belt. *Ore Geology Reviews*, v. 65(2), p. 487-501.
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, v. 52(4-6), p. 608-630.
- Jamali, H., Mahmoudabadipour, T. and Shokohi, H., 2017. Geochemical halos of gold and associated elements in the Nabijan gold deposit (West Kalibar groove, northwestern Iran). *Petrology Journal*, v. 8(30), p. 139-156 (In Persian).
- Jamali, H., Yaghubpur, A., Mehrabi, B., Dilek, Y., Daliran, F. and Meshkani, S.A., 2012. Petrogenesis and tectono-magmatic setting of Meso-Cenozoic magmatism in Azerbaijan province, Northwestern Iran. *Petrology-New Perspectives and Applications INTECH, Croatia*, p. 39-56.
- Keevil, N.B., 1942. Vapor pressures of aqueous solutions at high temperatures. *Journal of the American Chemical Society*, v. 64(4), p. 841-850.
- Kheirkhah, M., Allen, M.B. and Emami, M., 2009. Quaternary syn-collision magmatism from the Iran/Turkey borderlands, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 182(1-2), p. 1-12.

- Maghsoudi, A., Yazdi, M., Mehrpartou, M., Vosoughi, M. and Younesi, S., 2014. Porphyry Cu-Au mineralization in the Mirkuh Ali Mirza magmatic complex, NW Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 79(2), p. 932-941.
- Mehrpato, M. and Emami, M.H., 2002. Geological map of Varzeghan, scale 1:100,000, Geological Survey of Iran (In Persian).
- Mehrpato, M. and Nazer, N.Kh., 2008. Geological map of Kalibar, scale 1:100,000, Geological Survey of Iran (In Persian).
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bemroider, M., Prokofiev, V. and Honarmand, M., 2014. Geology, alteration, age, and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran, *Mineralium Deposita*, v. 49(2), p. 17-234.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science, New York, 1273 p.
- Richards, J.P. and Sholeh, A., 2016. The Tethyan Tectonic History and Cu-Au Metallogeny of Iran. *Economic Geologists. Inc. Special Publication*, v. 19, p. 193-212.
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R. and Zhou, X., 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types, *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, v. 7, p. 691-711.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions, *Reviews in mineralogy*, v.12.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determination from fluid inclusion studies, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 8(1), p. 263-301.
- Shekouei, H., 2003. Gold exploration in the northern Nabijan area. Geological Survey of Iran, 380 p (In Persian).
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H., 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*, Blackie, Glasgow, 239 p.
- Sholeh, A., Rastad, E., Huston, D., Gemmell, J.B. and Taylor, R.D., 2016. The Chahnaly low-sulfidation epithermal gold deposit, western Makran volcanic arc, Southeast Iran. *Economic Geology*, v. 111(3), p. 619-639.
- Simmonds, V. and Moazzen, M., 2015. Re-Os dating of molybdenites from Oligocene Cu-Mo-Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan, and Iran. *International Geology Review*, v. 57(3), p. 290-304.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposit. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, U.S.A, p. 485-522.
- Sohrabi, Q., Hosseinzadeh, M.R., Kalagari, A.A. and Haj Alilu, B., 2015. Study of molybdenum mineralization in the Qaradagh (Ordubad)-Shivardagh belt with emphasis on petrology, geochemistry and alteration of host intrusive masses (northwestern Iran). *Quarterly Journal of Earth Sciences*, v. 24(94), p. 243-258 (In Persian).
- Solat, A., Nazafati, N., Lotfi, M. and Aghazadeh, M., 2017. Fluid inclusion investigations of the Masjed Daghi copper-gold porphyry-epithermal mineralization, East Azerbaijan Province, NW Iran. *Open Journal of Geology*, v. 7(8), p. 1110-1127.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C., 1962. The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures, *American Journal of Science*, v. 260(2), p. 115-141.
- Urusova, M.A., 1975. Volume properties of aqueous solutions of sodium chloride at elevated temperatures and pressures, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, v. 20, p. 1717-1721.
- Vaziri-Hashi, F., Lotfi, M. and Emami, M.H., 2009. Mineralization characteristics and types of associated alterations in the Nabijan mineral phenomenon (Eastern Azerbaijan-Northwest Iran). *Petrology Journal*, v. 1(1), p. 27-48 (In Persian).
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration, *Society of Economic Geologists Newsletter*, v. 23(1), p. 9-13.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, v. 55(1), p. 229-272.
- Yasami, N., Ghaderi, M., Madanipour, S. and Taghilou, B., 2017. Structural control on overprinting high-sulfidation epithermal on porphyry mineralization in the Chodarchay deposit, northwestern Iran, *Ore Geology Reviews*, v. 86, p. 212-224